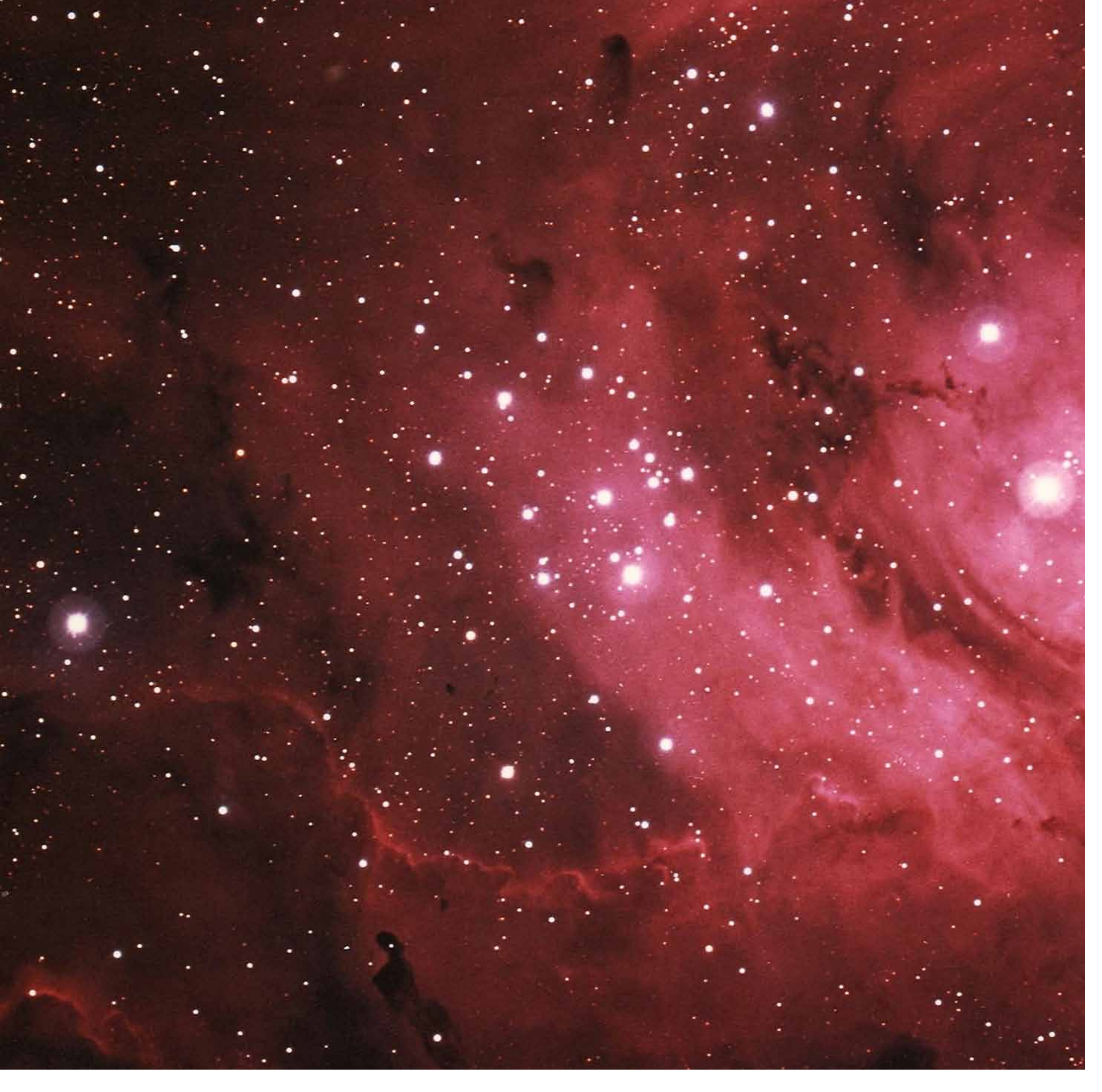
INVESTIGACION Y
CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



ESTRELLAS EN FORMACION

Agosto 1977

140 PTAS.

Número 11
Agosto 1977

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15
ESPAÑA

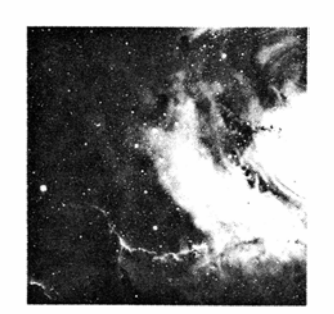
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Amando García: *La eliminación de los residuos radiactivos;* Ramón Pascual: *La utilidad de la radiación de sincrotón;* Ferrán Vallespinós: *Vida microbiana en las profundidades marinas;* Ramón Canal: *Los glóbulos de Bok;* Carles Enric Riba: *Memoria espacial;* Carlos Dante Heredia: *Enseñanzas de la fibroplasia retrolental;* Monique Robert: *Lectinas;* Andrés Muñoz Machado: *Taller y laboratorio;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* Gerardo Espinosa: *Ciencia y sociedad.*

Libros:

Philip Morrison y
Luis Vila López



LA PORTADA

La fotografía de la portada, realizada con el telescopio reflector de 150 pulgadas del Kitt Peak National Observatory, muestra partes de la nebulosa Laguna, de la constelación de Sagitario. La nebulosa se compone de gas y polvo. Una parte del gas es luminoso, porque sus átomos están excitados por radiación ultravioleta procedente de estrellas jóvenes incluidas en la nebulosa. Una parte del polvo se ve en forma de nube obscura, que impide el paso de la luz del gas y de las estrellas situados por detrás. Entre las nubes obscuras hay numerosos objetos circulares, pequeños, denominados glóbulos de Bok (en honor del astrónomo Bart J. Bok), que bien podrían ser nubes de gas y polvo en vías de colapsarse para formar estrellas (véase "Los glóbulos de Bok", por Robert L. Dickman, en este número). Ejemplo típico de un glóbulo de Bok pequeño es el punto negro, más o menos del tamaño de una pequeña imagen de estrella, situado un centímetro por debajo de la brillante estrella de la derecha. El halo y la cruz son artefactos causados por la óptica telescópica.

Suscripciones:

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-15 (España)

Condiciones de suscripción:

España:
Un año (12 números): 1.540 pesetas

Extranjero:
Un año (12 números); 30 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
160 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
225 pesetas.

Solicitado control **OJD**

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

La fotografía de la portada es cortesía del Kitt Peak National Observatory

Página	Fuente
6-19	Allen Beechel
21-22	Juan M. Martínez Moreno
23	Jean Stradan
24-27	Juan M. Martínez Moreno
31-38	George V. Kelvin
39	International Business Machines Corporation
45	Woods Hole Oceanographic Institution
46	Dan Todd
47	Woods Hole Oceanographic Institution
48	Ralph Morse
49-53	Dan Todd
54	Woods Hole Oceanographic Institution
58	Steward Observatory, University of Arizona
60-62	National Geographic Society-Palomar Observatory Sky Survey
63	Hale Observatories
64-67	Gabor Kiss
71	Ben Rose
72-75	Alan D. Iselin
76	Ben Rose
78	Alan D. Iselin
80	David S. Olton
81	Alan D. Iselin
83	J. D. Baum
84-87	Carol Donner
88	Gabor Kiss
89	Johns Hopkins Hospital
91	J. G. Collard y J. H. M. Temmink
92-95	Jerome Kuhl
96	Nathan Sharon
97	Jerome Kuhl
98	Garth L. Nicolson *(arriba)* Nathan Sharon *(abajo)*
99	Jerome Kuhl
100	Abraham Novogrodsky
102	Ilil Arbel
103	Laszlo Kubinyi
104-105	Ilil Arbel

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Fort, S.A.
Rosellón, 33 - Barcelona-15
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda.
Barcelona.
Printed in Spain - Impreso en España

Cartas

Señor Director:

Escribo respecto del grabado de un caballo al galope que se obtuvo de las fotografías realizadas por Eadweard Muybridge "El control de la marcha" [*Investigación y Ciencia,* febrero de 1977]. La posición de las patas delanteras en el recuadro n.º 9 tendría que invertirse para que pudiese ser compatible con la explicación sobre flexión-extensión. El grabado del recuadro n.º 9 muestra las patas trasera derecha y delantera derecha del caballo en una etapa ulterior de la fase de balanceo, mientras las patas izquierdas trasera y delantera están en las etapas iniciales de la misma fase.

Sostengo que el error se debió a que el grabador interpretó mal las fotografías. Suponiendo que el diagrama tenía una velocidad de 1/500 de segundo y el estado del arte fotográfico en 1872, imagino que las copias con las que tuvo que trabajar eran poco más que sombras.

MICHAEL CRAGGS

Granite Falls, Washington

Señor Director:

En "El origen de la ateroesclerosis", de Earl P. Benditt [*Investigación y Ciencia,* abril 1977], había una gráfica en que se comparaba la mortalidad por cáncer de colon con la mortalidad por enfermedad coronaria en varios países.

Ambas estaban correlacionadas, pero lo que hallé sorprendente fue que todos los países al lado superior derecho del gráfico fuesen angloparlantes, mientras ninguno de los países situados en el centro y abajo a la izquierda lo fuese. Aunque no deseo sugerir que el hablar inglés sea dañoso para la salud, debe haber seguramente un factor actuante que no esté en función del grado de desarrollo o de industrialización del país. Quizá tenga algo que ver con la alimentación, pero incluso eso es difícil de creer.

La división entre estas dos clases de países parece demasiado sorprendente como para que se trate de una coincidencia. ¿Podría sugerir alguien una causa para ello? En caso contrario, ¡quizá debería advertirse a la gente sobre los riesgos de hablar en inglés!

GERRIT L. VERSCHUUR

Universidad de Colorado
Boulder, Colorado.

Señor Director:

En su artículo "El reprocesado de los combustibles nucleares" [*Investigación y Ciencia,* febrero 1977], William P. Bebbington describe los productos de desecho del carbón como constituidos por ceniza prácticamente inocua y sin valor. De acuerdo con mi experiencia en los problemas de eliminación relacionados con la ceniza y los lodos sulfurosos procedentes de centrales eléctricas que queman hulla, me atrevo a discrepar.

La ceniza volandera de una central es alcalina, y puede contener oligoelementos metálicos peligrosos, según el tipo de carbón empleado. La ceniza de fondo puede ser alcalina o ácida, según la proporción de azufre del carbón quemado. Las piritas extraídas de la hulla durante la trituración son un residuo muy ácido. Las normas de calidad del aire emitidas en virtud de la Ley sobre Atmósfera Limpia (Clear Air Act), que limitan la emisión de dióxido de azufre, han originado un nuevo producto de la eliminación de residuos: lodo de depurador, con dióxido de azufre. A menos que el lodo, un compuesto azufrado pastoso, se estabilice, duplica la cantidad de desechos y puede significar dejar inutilizada una vasta extensión de terreno mientras funcione una central térmica de carbón. Puesto que los productos de desecho de las centrales de carbón no son "inocuos", es preciso eliminarlos de manera que no contaminen el terreno ni las aguas superficiales, ni deterioren el medio ambiente terrestre.

Durante la vida útil de una central térmica de carbón, los desechos de una central de 1000 megavatios pueden llevar de 260 a 520 hectáreas hasta una altura de 9 a 30 metros. En los Estados Unidos se produce hoy en día entre 50 y 60 millones de toneladas de ceniza de hulla cada año; las previsiones suponen duplicar esta cantidad hacia 1985. Una asignación de recursos de terreno de tal magnitud debería hacerse reconociendo plenamente lo que supone.

Como la eliminación puede plantear problemas, existen alternativas que deberían estudiarse. La ceniza posee grandes posibilidades como material de construcción, como relleno estructural, en bloques y ladrillos y en cemento. No obstante, está aún por perfeccionar la logística de la introducción de la ceniza en nuestra economía. Las centrales eléctricas no siempre están emplazadas en lugares convenientes para la construcción u otras actividades que podrían hacer uso de la ceniza. Ha de crearse una red de abastecimiento y distribución antes de que la ceniza pueda introducirse a escala importante en nuestra economía. Actualmente, en los Estados Unidos se aprovecha apenas alrededor del 10 por ciento de toda la ceniza producida.

En el análisis primario de las repercusiones de las centrales eléctricas que queman carbón, y que con excesiva frecuencia han ocasionado después la contaminación del aire, el agua y la tierra tiende a descuidarse la eliminación de la ceniza.

WILLIAM D. LILLEY

Consulting geologist
Elsmere, N. Y.

Los autores

BERNARD L. COHEN ("La eliminación de los residuos radiactivos") es profesor de física y de ingeniería química e ingeniería del petróleo en la Universidad de Pittsburgh. Es también director de los Scaife Nuclear Laboratories de dicha Universidad. El profesor Cohen recibió su B.S. del Case Institute of Technology en 1944, su M.S. de la Universidad de Pittsburgh en 1948 y su D.Sc. del Carnegie Institute of Technology en 1950. Desde 1950 hasta 1958 fue jefe del grupo de investigación del ciclotrón en el Oak Ridge National Laboratory. Desde 1958 pertenece a la Universidad de Pittsburgh. Es autor de dos libros sobre física nuclear y de un libro sobre ciencia nuclear y sociedad.

JUAN M. MARTINEZ MORENO ("El aceite de oliva") nació en Madrid, en 1919; en cuya Universidad se doctoró en ciencias químicas. Catedrático de Química Técnica de la Facultad de Ciencias de Sevilla. Desde 1952 es Director del Instituto de la Grasa y sus Derivados, en Sevilla (C.S.I.C.). Autor de un centenar de publicaciones y trabajos de investigación sobre el aceite de oliva, su química y su tecnología. Es miembro de la delegación española en el Consejo Oleícola Internacional (COI) y de la División de Ciencia Aplicada de la Unión Internacional de Química (IUPAC); académico correspondiente de la Real de Ciencias de Madrid, y numerario de la Real de Buenas Letras de Sevilla. Ha sido presidente de la International Society for Fat Research (ISF).

EDNOR M. ROWE y JOHN H. WEAVER ("La utilidad de la radiación de sincrotrón") son, respectivamente, director y asistente científico del Synchrotron Radiation Center de la Universidad de Wisconsin en Madison. Rowe recibió su B. S. en física por la Universidad de Purdue en 1954. Pasó luego a la recientemente formada Midwestern University Research Association (MURA), organizada para estudiar aspectos avanzados en el diseño de aceleradores. Permaneció en la MURA durante 13 años, supervisando la construcción de aceleradores e investigando tecnologías relacionadas. En 1967 se disolvió la MURA y el laboratorio y el personal se integraron en la Universidad de Wisconsin. Rowe ha dirigido el Synchrotron Radiation Center de Wisconsin desde 1970 y ha trabajado en el desarrollo de la radiación de sincrotrón a escala nacional e internacional. Su principal interés reside en la aplicación de los aceleradores de partículas y sus tecnologías en áreas distintas de la física nuclear y de la física de partículas elementales. Weaver pertenece al equipo científico del Synchrotron Radiation Center desde 1974. Recibió sus grados de Bachelor y Master en física por la Universidad de Missouri en Kansas City. Después de completar su Ph. D. en física del estado sólido en la Iowa State University en 1973, estuvo un año como becario post-doctoral en la Universidad de Missouri en Rolla. Su campo de investigación se centra en la estructura electrónica de la materia de los metales de transición, de tierras raras y actínidos.

HOLGER W. JANNASCH y CARL O. WIRSEN ("Vida microbiana en las profundidades marinas") pertenecen al departamento de biología de la Woods Hole Oceanographic Institution. Jannasch nació en Alemania, estudió microbiología en las universidades de Munich y Gottinga, en cuyo último centro se doctoró en 1955. Como investigador asociado a la Sociedad Max Planck trabajó en la Scripps Institution of Oceanography y en la Universidad de Wisconsin en Madison. Entró en la Woods Hole Oceanographic Institution como profesor de investigación en 1963. Desde 1971 dirige un curso de verano de ecología microbiana en el Marine Biological Laboratory, en Woods Hole. Además de sus trabajos sobre la microbiología del fondo del océano, Jannasch se ha interesado en la dinámica del crecimiento, supervivencia y desarrollo de las poblaciones de bacterias marinas y en las bacterias del ciclo del azufre.

ROBERT L. DICKMAN ("Los glóbulos de Bok") es investigador asociado en el departamento de física del Instituto Politécnico de Rensselaer, y trabaja en las instalaciones para ondas de radio milimétricas de la Aerospace Corporation, en los Angeles. Se graduó y doctoró por la Columbia University. "Mi campo básico de investigación son los estados observacionales de las moléculas interestelares", escribe. "Me he dedicado a las cuestiones relacionadas con la estabilidad gravitatoria de los glóbulos de Bok, con las abundancias de los isótopos del monóxido de carbono en las nubes oscuras interestelares y con los mecanismos por los cuales las moléculas de esas nubes emiten su radiación."

DAVID S. OLTON ("Memoria espacial") es profesor adjunto del departamento de Psicología de la Universidad Johns Hopkins. Estudió con Robert L. Isaacson en la Universidad de Michigan; naciendo allí su interés por la memoria espacial. Los experimentos con laberintos radiales descritos en este artículo fueron una prolongación inesperada de otro experimento que inició con Robert Samuelson, un alumno no graduado de la Johns Hopkins. De sí mismo escribe: "siempre me ha interesado mucho el aprendizaje espacial, acaso porque yo siempre he tenido problemas con las relaciones espaciales. Cuando vi el buen nivel de ejecución que los animales obtenían en la prueba del laberinto radial, comprendí que era posible desarrollar nuestra comprensión de las aptitudes espaciales de los animales".

WILLIAM A. SILVERMAN ("Enseñanzas de la fibroplasia retrolental") trabaja como médico en el California Department of Rehabilitation. Tras haberse graduado en la University of California Medical School practicó como interno y residente en el University of California Hospital en San Francisco. En 1944 se trasladó al hospital infantil del Columbia-Presbyterian Medical Center, en donde estuvo durante 25 años, incorporándose al claustro como profesor de pediatría de la Columbia University College of Physicians and Surgeons. Silverman se convirtió en un profundo estudioso de los problemas médicos que afectan a los prematuros y de un modo particular de la epidemia de ceguera que brotó el año en que se abría el primer centro de prematuros en el hospital infantil (1950).

NATHAN SHARON ("Lectinas") es coordinador del departamento de biofísica del Weizmann Institute of Science, de Israel. Está en dicha entidad desde 1954. Agregado de investigación en la Harvard Medical School de 1956 a 1958 y, más tarde, durante el curso académico 1962-1963. De 1970 a 1971 fue profesor invitado en el departamento de bioquímica de la Universidad de California en Berkeley. Actualmente, su interés se centra principalmente en la estructura y la función biológica de los azúcares de las membranas celulares y está haciendo uso de las lectinas como uno de sus instrumentos de investigación primordiales.

La eliminación de los residuos radiactivos

Abundante información al respecto indica que los desechos radiactivos de elevada actividad, producidos en las centrales nucleares, se pueden almacenar satisfactoriamente en formaciones geológicas profundas

Bernard L. Cohen

Frecuentemente se dice que el problema de eliminar los residuos radiactivos producidos por las centrales nucleares es una de las principales dificultades con que debe enfrentarse la continua expansión de la capacidad para producir energía eléctrica por medio de los procesos de fisión. De hecho, esta tarea no es tan difícil ni tan incierta como mucha gente parece creer. Desde 1957, en que una comisión de la National Academy of Sciences de Estados Unidos propuso por vez primera el enterramiento de tales residuos en el seno de formaciones rocosas profundas y geológicamente estables, se ha ido acumulando una abundante información acerca de la posibilidad técnica, la practicabilidad económica y la relativa seguridad de esta forma de abordar la cuestión. En años más recientes, se han propuesto también una serie de soluciones alternativas –algunas de las cuales consisten en el enterramiento bajo el mar–, pero el enterramiento terrestre a gran profundidad sigue siendo la solución mejor estudiada y más ampliamente recomendable del problema de la eliminación de residuos nucleares.

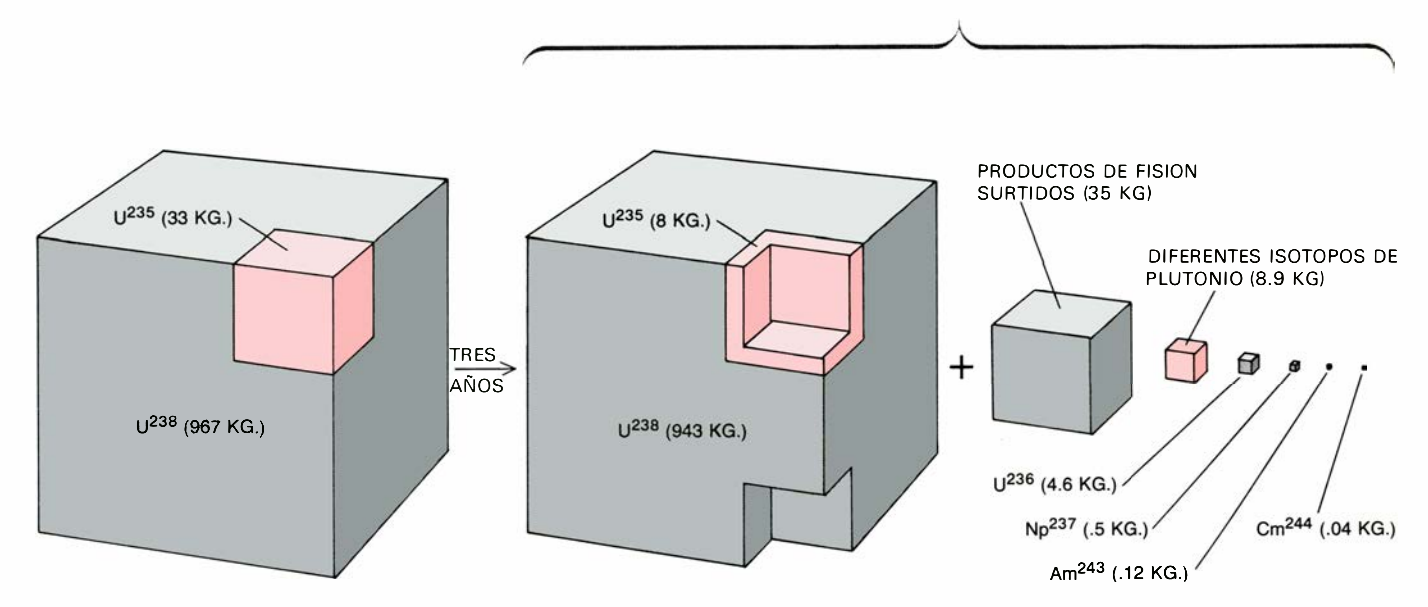
A continuación voy a describir la naturaleza de los residuos producidos por los reactores nucleares, a evaluar su posible repercusión sobre la salud pública y el medio ambiente y a perfilar los planes actuales para evacuarlos en depósitos subterráneos seguros.

¿Cuáles son las características específicas de los residuos de las instalaciones nucleares y en qué se diferencian de los producidos en la combustión de los demás combustibles utilizados en la producción de electricidad? A efectos de comparación, es conveniente que consideremos en primer lugar los residuos procedentes de una gran central que produzca energía eléctrica por combustión de carbón (con una potencia de 1000 megavatios). En este caso, el residuo principal es el anhídrido carbónico que se emite por sus chimeneas a razón de unos 300 kilogramos por segundo. En sí mismo, el anhídrido carbónico no es un gas peligroso, pero existe una preocupación creciente en el sentido de que las grandes cantidades de esta sustancia que se están enviando a la atmósfera procedentes de la combustión de los diferentes combustibles fósiles puedan producir efectos nocivos a largo plazo en el clima mundial. El contaminante más peligroso que se produce en una planta de combustión de carbón es el anhídrico sulfuroso: esta sustancia se emite a razón de unos 5 kilogramos por segundo. De acuerdo con un reciente estudio llevado a cabo bajo los auspicios de la National Academy of Sciences, el anhídrido sulfuroso que emana por las chimeneas de una sola planta de combustión de carbón ocasiona cada año unas 25 muertes, 60.000 casos de enfermedades respiratorias y 12 millones de dólares en daños materiales. Entre los otros gases venenosos que producen las instalaciones generadoras de energía por combustión de carbón, cabe citar a los óxidos de nitrógeno, que constituyen el principal contaminante emitido por los tubos de escape de los automóviles (una gran central de combustión de carbón emite la misma cantidad de estos óxidos que 200.000 automóviles), y al benzopireno, que es el principal agente cancerígeno de los cigarrillos. Se producen también residuos sólidos, en parte bajo la forma de partículas de muy pequeño tamaño. En la actualidad, en los Estados Unidos, a estas "partículas pequeñas" se les atribuye el segundo lugar de importancia en razón a su peligrosidad como contaminantes del aire, inmediatamente detrás del anhídrido sulfuroso; aproximadamente una sexta parte de toda la contaminación sólida originada por el hombre proviene de las instalaciones de producción de energía por combustión de carbón. Finalmente, existe un residuo de cenizas, que una central de 1000 megavatios de este tipo produce a razón de 15 kilogramos por segundo.

Los desechos de una central nuclear de tamaño equivalente a la citada anteriormente difieren de los producidos por aquélla en dos aspectos muy importantes. En primer lugar, su cantidad total es millones de veces más pequeña: cuando los residuos se preparan adecuadamente para su almacenamiento, el volumen total que produce anualmente un reactor nuclear de 1000 megavatios es de unos dos metros cúbicos, es decir, una cantidad que podría colocarse fácilmente bajo una mesa de comedor. Las cantidades de materiales radiactivos que se manejan en este caso, mucho más pequeñas comparativamente, hacen posible en la práctica la utilización de procedimientos de manipulación de residuos muy elaborados, cuyo coste debe ser considerado en relación con el precio de la electricidad generada. Para una planta de unos 1000 megavatios, este coste se estima en unos 200 millones de dólares por año.

La segunda característica diferenciadora de los desechos nucleares es que su potencial como peligro para la salud no es una consecuencia de sus propiedades químicas, sino de la radiación que emiten. Parece existir una impresión muy generalizada en el sentido de que este factor introduce un considerable grado de incertidumbre en la evaluación de dicho

ACUMULACION DE PRODUCTOS DE REACCION por cada tonelada de combustible de uranio en el núcleo activo de un reactor típico de agua ligera, representada según dos escalas verticales diferentes en función del tiempo a lo largo de los tres años que el combustible suele permanecer en dicho núcleo. Los centenares de productos que se originan en la fisión de los núcleos de uranio-235 presentes en el combustible están representados por dos fragmentos de fisión característicos, el estroncio-90 y el cesio-137, que juntos constituyen alrededor del 5 por ciento del total. Todos los demás nucleidos a los que se alude se producen en reacciones nucleares en las que los núcleos de uranio del combustible original sufren una transmutación por captura de neutrones, seguida en algunos casos por desintegraciones radiactivas. La nivelación en la curva del plutonio-239 significa que, al final de la vida útil del combustible, se consume casi tan deprisa como se va creando.



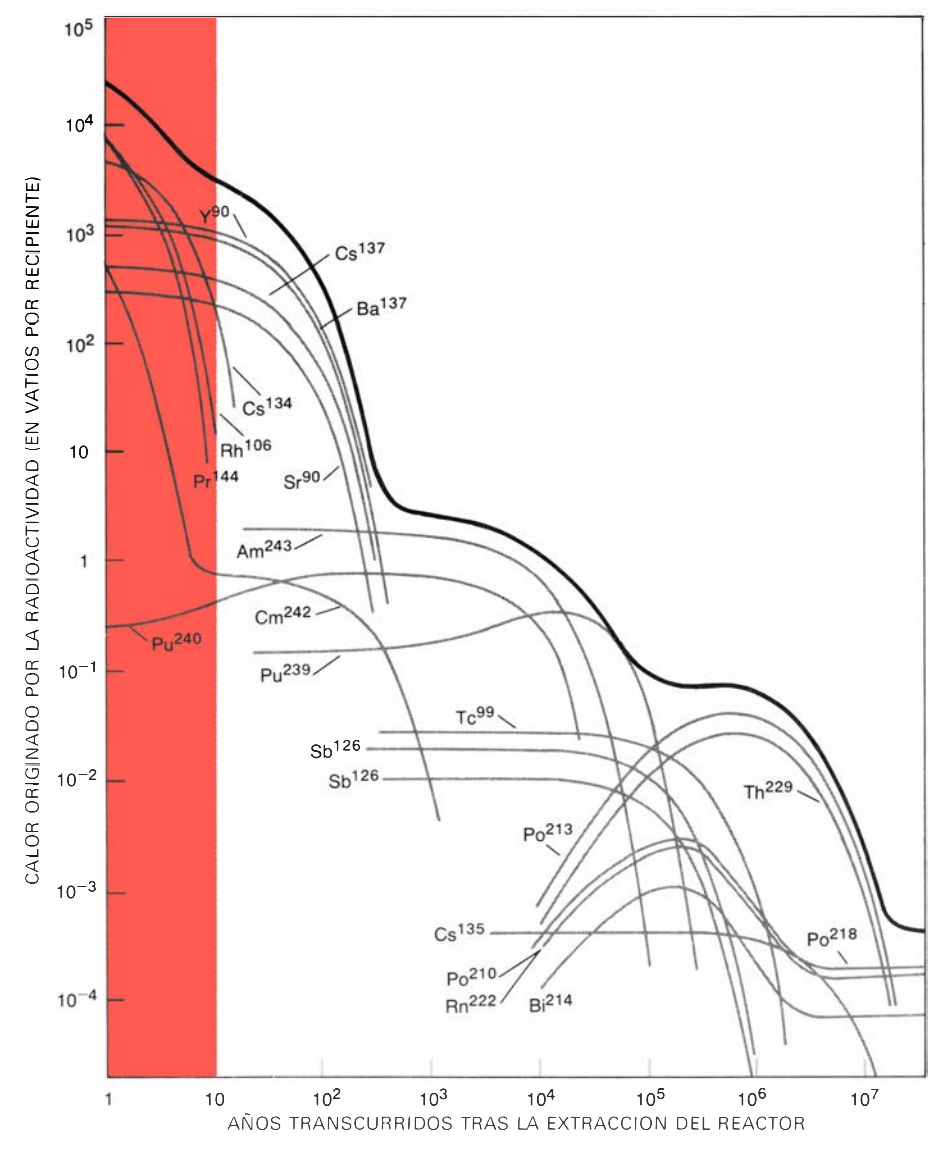
EL DIAGRAMA DE BLOQUES ilustra de otro modo la transformación que se produce en la composición del combustible de un reactor de agua ligera a lo largo de tres años. Por cada 1000 kilogramos de uranio en la carga inicial de combustible *(izquierda)*, se consumen 24 kilogramos de uranio-238 y 25 kilogramos de uranio-235 *(centro)*, reduciendo el "enriquecimiento" del uranio-235 desde el 3,3 al 0,8 por ciento. El uranio consumido se convierte en 35 kilogramos de productos de fisión surtidos, 8,9 kilogramos de diferentes isótopos de plutonio, 4,6 kilogramos de uranio-236, 0,5 kilogramos de neptunio-237, 0,12 kilogramos de americio-243 y, por último, 0,04 kilogramos de curio-244 *(derecha)*.

peligro, pero en realidad sucede justamente lo contrario. Los efectos de la radiación sobre el cuerpo humano son mucho mejor conocidos que los efectos de sustancias químicas tales como los contaminantes del aire, los aditivos de los alimentos y los pesticidas. La radiación se puede medir con gran precisión mediante instrumentos económicos y muy sensibles; de hecho, ésta es la razón que justifica el uso generalizado de isótopos radiactivos en la investigación biomédica. Por otro lado, durante muchos años se ha ido acumulando una ingente cantidad de información acerca de la exposición humana a las radiaciones intensas, incluyendo los ataques con bombas atómicas sobre el Japón, el tratamiento médico con diferentes formas de radiación y la inhalación de gas radón por los mineros. Los datos de que se dispone han sido cuidadosamente analizados por diferentes grupos nacionales e internacionales, entre los que se incluyen el Comité sobre los Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes, de la National Academy of Sciences, y el Comité sobre los Efectos de la Radiación Atómica, de las Naciones Unidas. El resultado de todos estos estudios constituye un conjunto de estimaciones razonablemente digno de confianza acerca de los efectos máximos de los diferentes niveles de radiación sobre el cuerpo humano.

¿Cuáles son las sustancias radiactivas presentes en los productos de desecho de un reactor nuclear y cómo se forman? En un reactor de agua ligera (el tipo de reactor nuclear que se usa generalmente en la actualidad para producir electricidad), el combustible consiste inicialmente en una mezcla de dos isótopos de uranio: el uranio-235, fácilmente fisionable y escaso ("enriquecido" hasta un 3,3 por ciento) y el uranio-238, generalmente no fisionable y mucho más abundante (97,7 por ciento). La mezcla combustible se prepara en forma de pastillas cerámicas de dióxido de uranio (UO_2), encerradas en el interior de tubos de acero inoxidable o de una aleación de zirconio. En el transcurso de la operación del reactor, los neutrones producidos inicialmente en la fisión de algunos de los núcleos de uranio-235 chocan contra otros núcleos de uranio, dividiéndolos en dos fragmentos (como consecuencia de este proceso, tiene lugar una reacción en cadena) o siendo absorbidos por ellos (se produce así un aumento de una unidad en el peso atómico del núcleo bombardeado). Estos dos tipos de reacción originan una gran variedad de productos nucleares, cuya cantidad aumenta a medida que transcurre el tiempo en que el combustible está en el reactor, y que generalmente es del orden de tres años *(véase la figura superior de la página anterior)*.

De todas las reacciones que tienen lugar en un reactor de agua ligera, la más importante es la fisión del uranio-235, que crea centenares de productos diferentes, de los cuales el estroncio-90 y el cesio-137, dos fragmentos de fisión característicos, constituyen alrededor de un 5 por ciento del total. Otra reacción importante es la captura de neutrones por los núcleos de uranio-238, que da lugar a plutonio-239. (De hecho, la reacción de captura neutrónica conduce en principio al uranio-239; posteriormente se llega al plutonio-239 a través de un proceso de desintegración en dos etapas.) El plutonio-239 no sigue acumulándose linealmente con el tiempo, debido a que este núcleo también puede participar en reacciones nucleares. Por ejemplo, un núcleo de plutonio-239 puede fisionarse al ser bombardeado por un neutrón, o puede absorber a dicho neutrón y convertirse en un núcleo de plutonio-240. La tendencia hacia la nivelación horizontal que muestra la curva del plutonio-239 significa que, cerca del final de la vida eficaz de la carga de combustible, dicho isótopo está desapareciendo en virtud de estos procesos con una velocidad prácticamente igual a aquella con la que se está creando.

El plutonio-240 también puede capturar un neutrón y convertirse en pluto-



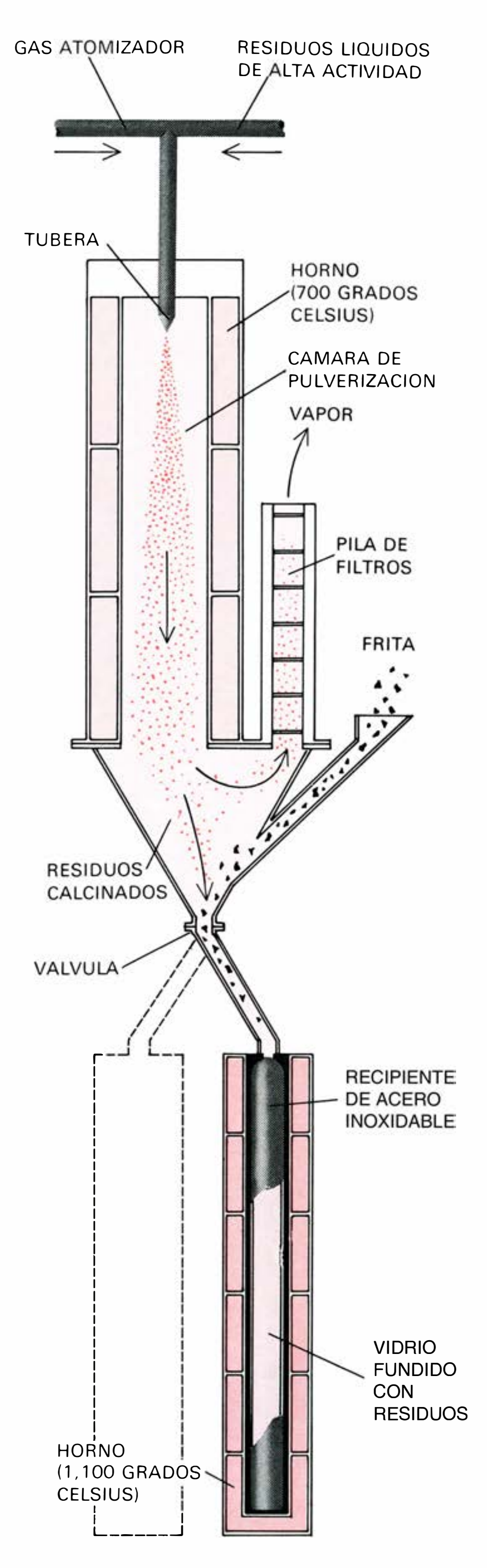
EL CALOR GENERADO por los diferentes isótopos radiactivos del combustible consumido en una central nuclear debe poder disiparse de forma segura. Esto significa que, en cualquier plan de almacenamiento a largo plazo, los recipientes que contengan los residuos de alta actividad deben distribuirse espaciados sobre una superficie relativamente grande. El problema se puede aliviar mucho recurriendo a un periodo de almacenamiento provisional de unos 10 años de duración *(zona coloreada a la izquierda)*; **tras el cual el calor generado por cada recipiente habrá disminuido hasta unos 3,4 kilovatios. Las curvas de color grisáceo muestran las diferentes contribuciones de los isótopos radiactivos más importantes al efecto de calentamiento total dado por la curva en negro.**

nio-241, el cual a su vez puede sufrir una fisión o capturar a otro neutrón y convertirse en plutonio-242. Por captura de un nuevo neutrón, el plutonio-242 se puede convertir en americio-243 (a través de un proceso de desintegración radiactiva del plutonio-243) y todavía se crea una cantidad apreciable de curio-244 gracias a la captura de un neutrón más seguida por otra desintegración radiactiva. Como resultado de una secuencia análoga a la que acabamos de describir, en una serie de capturas neutrónicas sucesivas, a partir del uranio-235 se puede obtener uranio-236, neptunio-237 y plutonio-238.

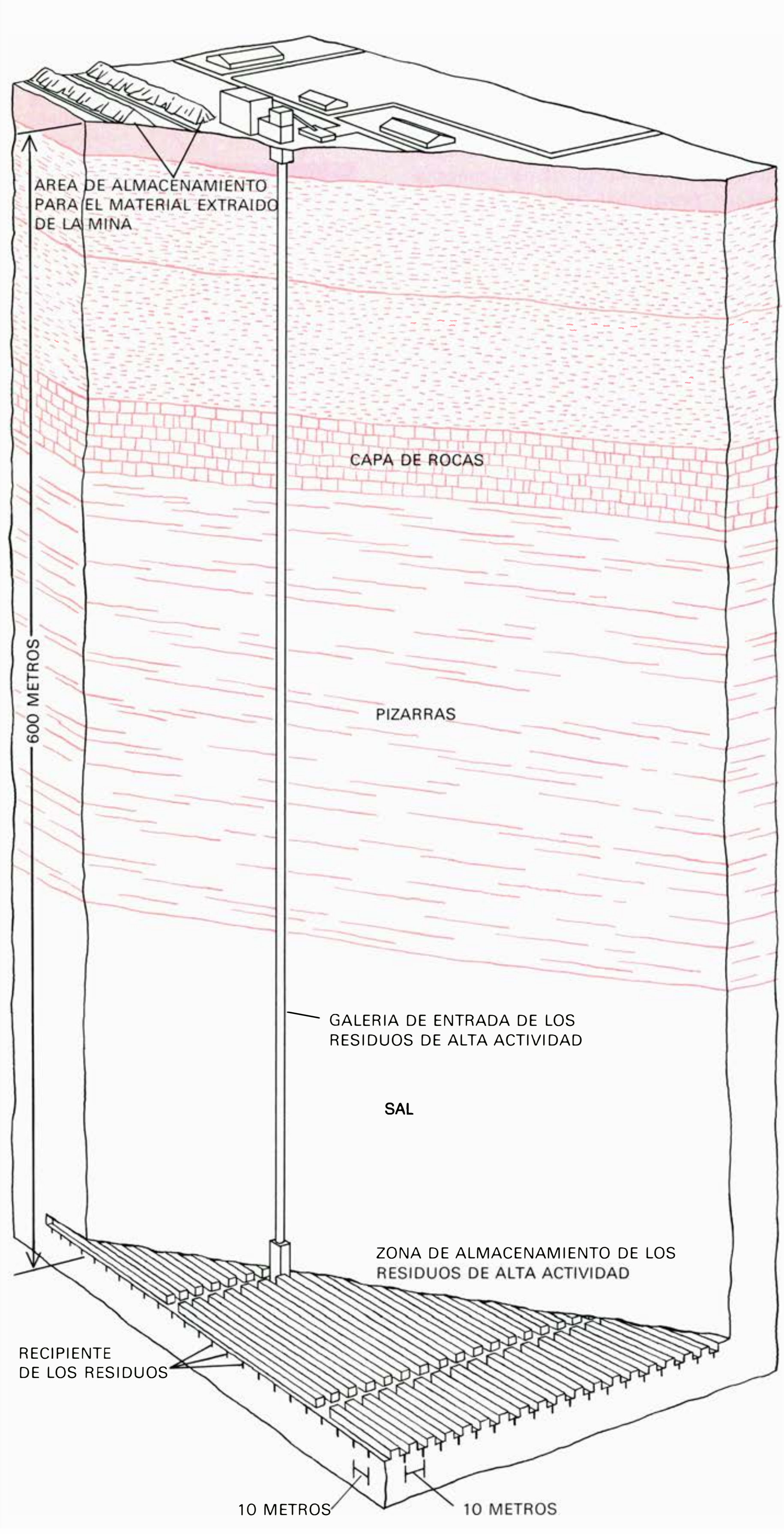
Por cada tonelada métrica de uranio existente en la carga de combustible inicial de un reactor nuclear, a lo largo del citado período de tres años, se consumen 24 kilogramos de uranio-238 y 25 kilogramos de uranio-235, con lo cual el enriquecimiento del uranio-235 se reduce desde el 3,3 por ciento al 0,8 por ciento. En este proceso se pueden generar 800 millones de kilovatios-hora de energía eléctrica. El uranio consumido se convierte en 35 kilogramos de productos de fisión diversos, 8,9 kilogramos de diferentes isótopos de plutonio, 4,6 kilogramos de uranio-236, 0,5 kilogramos de neptunio-237, 0,12 kilogramos de americio-243 y 0,04 kilogramos de curio-244. Puesto que sólo se han consumido 25 kilogramos de uranio-235 y la quinta parte de esta cantidad se ha convertido en uranio-236 y neptunio-237, se puede calcular fácilmente que de hecho solamente el 60 por ciento de las reacciones de fisión productoras de energía se producen en el uranio-235. El 31 por ciento de ellas se producen en el plutonio-239, el 4 por ciento tienen su origen en el plutonio-241 y el 5 por ciento restante se inducen en la interacción de neutrones de alta energía con el uranio-238. (Estas cifras representan valores medios calculados sobre los tres años que el combustible suele permanecer en el reactor. Cerca del final de ese período, sólo un 30 por ciento de las reacciones de fisión se producen en el uranio-235, mientras que el 54 por ciento de ellas se producen en el plutonio-239, el 10 por ciento en el plutonio-241 y el 5 por ciento en el uranio-238. A la vista de la controversia pública, tan en boga actualmente, acerca del problema del reciclaje de plutonio en los reactores nucleares, resulta interesante señalar que el plutonio ya se está usando intensivamente en nuestros días como combustible nuclear.)

Una vez que el combustible consumido se ha extraído del reactor, se almacena durante unos cuantos meses con el fin de permitir la desintegración de los isótopos radiactivos cuyo período de semidesintegración es corto. (Este almacenamiento provisional es particularmente importante en relación con un isótopo tal como el iodo-131, uno de los productos de fisión más peligrosos, cuyo período de semidesintegración es tan sólo de ocho días.) A continuación, una de las opciones consistiría en enviar el combustible consumido a una planta de reprocesamiento químico, en la cual las correspondientes barras se cortarían en porciones de pequeña longitud, se disolverían en ácido y se someterían a una serie de procesos de separación química con el fin de separar el uranio y el plutonio y proceder a la separación de nuevo combustible. El resto del material (excepto ciertos gases que se descargarían por separado y las partes metálicas de los elementos combustibles que no se disuelven en el ácido) sería lo que se denomina desecho de "alta actividad". Además de todos los productos de fisión, que son los responsables de la mayor parte de esta actividad, estos residuos incluirían isótopos de neptunio, americio y curio, junto con las pequeñas cantidades de uranio y plutonio que no habrían sido extraídas en la operación de reprocesamiento, debido a las ineficiencias de las separaciones químicas.

El modo más simple y más directo de eliminar los restantes residuos de alta actividad (una vez que se haya acumulado una cantidad suficiente desde el punto de vista económico) consistiría en enterrarlos permanentemente a gran profundidad. A primera vista, este procedimiento parece ser razonablemente seguro, puesto que todas las rocas contienen trazas de sustancias radiactivas naturales, tales como uranio, torio, potasio y rubidio, y la cantidad total de esta radiactividad natural existente en el subsuelo de los Estados Unidos, por encima de los 600 metros de profundidad que se proponen para el enterramiento de los residuos nucleares, es enormemente mayor que la radiactividad de los residuos que se producirían si toda la energía eléctrica que se consume en dicho país tuviera su origen en la fisión nuclear. Desde luego, la radiactividad de los residuos nucleares está mucho más concentrada, pero, en principio, este hecho no altera la validez del razonamiento anterior, puesto que generalmente se supone que los efectos biológicos de la radiación están en relación lineal con la dosificación, de forma que si se distribuyese una determinada dosificación total entre más personas no cambiaría el número de



PLAN ACTUAL para el tratamiento de los residuos radiactivos de alta actividad, que exige su incorporación en el seno de cilindros de vidrio de unos 300 centímetros de longitud y 30 centímetros de diámetro. En el proceso de solidificación en una sola etapa, los desechos líquidos se convierten en polvo fino en el interior de una cámara de calcinación *(arriba)*; a continuación, se mezclan con frita de vidrio *(centro)* y, finalmente, se funden en forma de un bloque vítreo que se encierra en el interior de un recipiente de acero inoxidable de paredes gruesas en el cual se almacenará más adelante *(abajo)*. Cuando el recipiente está lleno, el flujo se conmuta mediante una válvula a un nuevo recipiente *(línea de trazos)*; por tanto, el proceso es continuo.



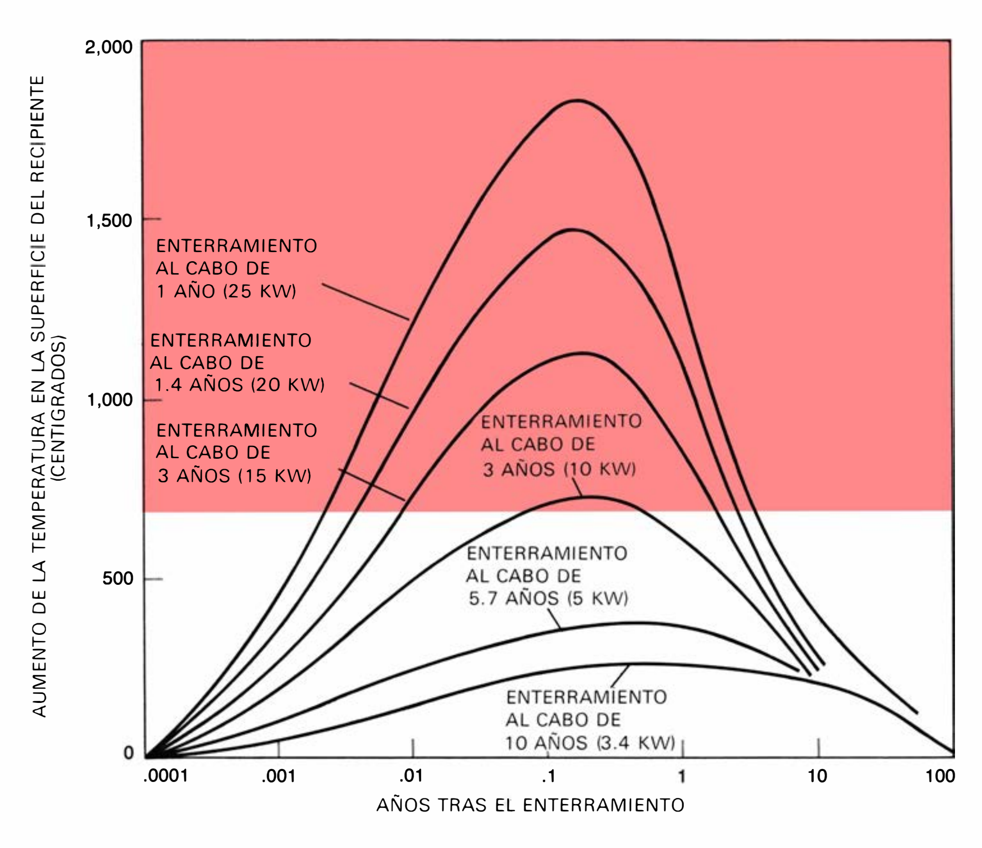
EL ENTERRAMIENTO SUBTERRANEO A GRAN PROFUNDIDAD es el método recomendado en la actualidad por la mayoría de los expertos en energía nuclear de los Estados Unidos para el almacenamiento a largo plazo de residuos radiactivos de alta actividad. Este diagrama idealizado corresponde a un depósito federal que se proyecta instalar en Nuevo México. Los recipientes que contienen los residuos se muestran situados a una profundidad de 600 metros en una formación salina geológicamente estable. Con el fin de disipar el calor que emiten los recipientes, éstos deberían enterrarse con una separación de unos 10 metros entre sí: de este modo, cada recipiente ocuparía una superficie de unos 100 metros cuadrados. Sobre esta base, los residuos de alta actividad producidos en un año por un sistema de energía eléctrica nuclear en Estados Unidos (con 400 centrales de 1000 megavatios cada una) ocuparían menos de medio kilómetro cuadrado.

efectos adversos para la salud. (Si se llegase a abandonar esta "hipótesis de linealidad", sería preciso rebajar drásticamente los actuales cálculos sobre los peligros potenciales para la salud originados por los residuos nucleares y todos los otros aspectos de la industria nuclear.)

Los procedimientos detallados para el manejo de los residuos de alta actividad no son todavía definitivos, pero hasta donde se sabe, los residuos serían incorporados en un vidrio de borosilicio (similar al Pyrex), preparado en forma de cilindros de 3 metros de longitud y 30 centímetros de diámetro. Cada cilindro de vidrio iría revestido por un recubrimiento hermético de acero inoxidable de paredes gruesas. Estos recipientes serían transportados posteriormente a un depósito para su enterramiento. Los residuos producidos en un año por una central nuclear de 1000 megavatios cabrían en 10 de dichos recipientes, los cuales serían enterrados con una separación de 10 metros entre sí; en consecuencia, cada recipiente ocuparía una superficie de 100 metros cuadrados y los 10 recipientes citados anteriormente ocuparían 1000 metros cuadrados. Se ha estimado que para cubrir las necesidades de energía eléctrica de los Estados Unidos, con un origen totalmente nuclear, serían necesarias unas 400 centrales de 1000 megavatios cada una, capaces de generar 400.000 megavatios a pleno rendimiento; en la actualidad, el consumo medio de energía eléctrica en dicho país es del orden de 230.000 megavatios. De acuerdo con estas cifras, la totalidad de los residuos producidos anualmente en los Estados Unidos por un sistema de energía eléctrica totalmente nuclear ocuparía una superficie de menos de medio kilómetro cuadrado.

La razón principal para que los recipientes en cuestión tengan que diseminarse en una superficie tan grande es la disipación del calor generado por su radiactividad. El problema que representa este calor se puede reducir sustancialmente si el enterramiento se lleva a cabo 10 años después de efectuada la operación de reprocesamiento; una vez transcurrido dicho tiempo, el calor generado por cada recipiente habrá disminuido hasta unos 3,4 kilovatios. La ventaja que supone el enterramiento retardado se ve más claramente cuando el efecto de calentamiento se expresa en forma del aumento de temperatura que se calcula que se produciría en la superficie de un recipiente aislado enterrado en el seno de una roca de conductividad

térmica media *(véase la ilustración de la derecha).* Resulta evidente que el enterramiento, tras una espera de un año, conduciría a un aumento de la temperatura de 1900 grados centígrados, en tanto que una espera de 10 años reduciría el aumento a 250 grados C. La diferencia es crítica, puesto que el vidrio se desvitrifica (es decir, cristaliza y se hace quebradizo) a temperaturas superiores a los 700 grados C. En el seno de unas rocas de conductividad térmica media, la máxima temperatura media de las rocas situadas inmediatamente por encima y por debajo del lugar de enterramiento se alcanzaría 40 años después de producido éste; al cabo de dicho tiempo, la temperatura media en el lugar del enterramiento habría aumentado en 140 grados C. *(véase la ilustración de la página siguiente).* Si el recipiente se enterrara en sal, cuya conductividad térmica es mucho mayor, el aumento de la temperatura en el nivel del enterramiento tras 40 años sería mucho menor: 85 grados centígrados.



LA CONVENIENCIA DE POSTERGAR EL ENTERRAMIENTO se pone de manifiesto en esta gráfica, en la cual el efecto de calentamiento de un recipiente de residuos se expresa en forma del aumento estimado de temperatura que se produciría en su superficie suponiendo que el recipiente en cuestión estuviera enterrado en el seno de rocas de conductividad térmica media. Los números que caracterizan a cada curva indican el calor generado por el recipiente (en kilovatios) una vez transcurrido un cierto tiempo de almacenamiento provisional (en años). Así, si el enterramiento se efectúa al cabo de un año *(curva superior)* **se producirá un aumento de temperatura de 1900° C, mientras que si se dejan transcurrir 10 años** *(curva inferior),* **dicho aumento se reducirá a 250° C. El área coloreada superior se refiere al fenómeno crítico según el cual el vidrio se desvitrifica (es decir, cristaliza y se hace quebradizo) a temperaturas superiores a los 700 grados Celsius.**

En el caso de la sal debe tenerse en cuenta un efecto adicional, puesto que el calor producirá una migración de agua hacia el recipiente de los residuos. Las formaciones salinas típicas contienen alrededor de un 0,5 por ciento de agua atrapada en el interior de pequeñas cavidades o bolsas.

La solubilidad de la sal aumenta con la temperatura, de forma que si la temperatura en un extremo de una de dichas cavidades aumenta, en ese extremo se disolverá más sal. Como consecuencia, el contenido de sal en el agua se eleva por encima del punto de saturación que corresponde a la temperatura que existe en el extremo opuesto de la cavidad, y ello hace que la sal precipite fuera de la solución en dicho extremo. El efecto neto de todo este proceso es una migración de las cavidades de agua en la dirección de las temperaturas más elevadas, es decir, en la dirección en que está enterrado el recipiente de residuos. La velocidad de migración depende de cuán rápidamente aumente la temperatura con la distancia y de cuán rápidamente disminuya con el tiempo el gradiente de temperatura al que me he referido anteriormente.

Se cree que este proceso conducirá a una acumulación de agua alrededor de cada recipiente, inicialmente a razón de dos o tres litros por año. Al cabo de 25 años, se habrán acumulado un total de 25 litros; posteriormente, la acumulación será muy pequeña. Puesto que la temperatura en la superficie de un recipiente sería más elevada que la temperatura de ebullición del agua, el agua que llegara junto al recipiente se convertiría en vapor y sería extraída por el sistema de ventilación (suponiendo que el depósito de los residuos no estuviera cerrado al exterior). Las pequeñas cantidades de agua que continuarían llegando a los recipientes después de 25 años serían portadoras de sustancias corrosivas, tales como ácido clorhídrico, originadas en las reacciones químicas inducidas en la sal por la radiación procedente de los recipientes. Por consiguiente, suele suponerse que las cubiertas de acero inoxidable desaparecerían por efecto de la corrosión y dejarían a los cilindros de vidrio que contienen a los residuos radiactivos en contacto con la sal.

¿Cómo se puede evaluar el peligro que representan para la salud dichos desechos radiactivos? El peligro más directo reside en la radiación gamma que se emite en la desintegración de los núcleos. Los rayos gamma se comportan de forma similar a la de los rayos X, excepto en el hecho de que son aun más penetrantes. El efecto de los rayos gamma (o de cualquier otra forma de radiación) sobre el cuerpo humano se mide en una unidad llamada rem, que equivale a la cantidad de radiación necesaria para producir el mismo efecto biológico que un roentgen de radiación X. (La palabra "rem" está formada por las iniciales de *"roentgen equivalent man".*) Al analizar la repercusión de los residuos radiactivos sobre la salud pública, los únicos efectos significativos de la radiación que es preciso considerar son los que producen cáncer y los que inducen defectos genéticos en la descendencia. De acuerdo con las mejores estimaciones de que se dispone en la actualidad, para una irradiación global tal como la que produciría una fuente de rayos gamma fuera del cuerpo, la probabilidad de contraer un cáncer fatal inducido por la radiación es aproximadamente de 1,8 casos de cada 10.000 por cada rem de exposición. El riesgo estimado para eventuales defectos genéticos de cualquier género en la descendencia se cifra en 1,5 casos de cada 10.000 por cada rem de radiación recibida por los órganos de reproducción (cuyos efectos alcanzarían a unas cinco generaciones). En la exposición que sigue, yo me referiré sólo a los cánceres, pero no debemos ol-

vidar que la exposición a la radiación ocasiona además cierto número comparable (aunque generalmente menor) de defectos genéticos.

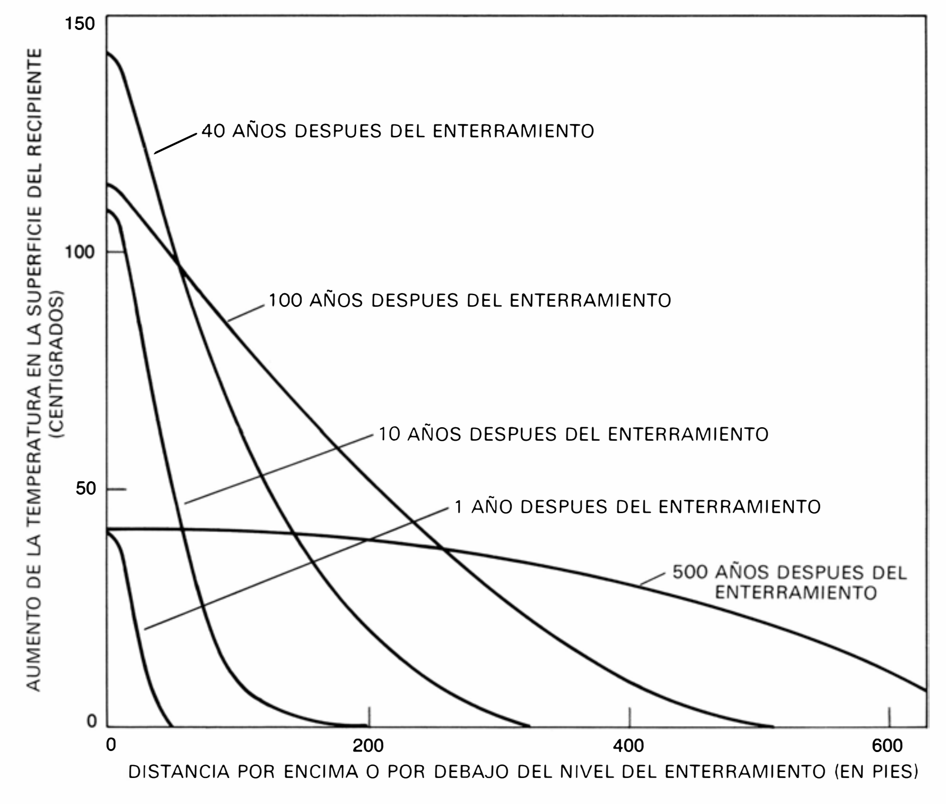
En la mayoría de los casos, el daño biológico que produce un rayo gamma es aproximadamente proporcional a la energía de esta radiación. Por consiguiente, podemos empezar por representar gráficamente la energía de los rayos gamma que se emitirían en cada segundo (en vatios) por los residuos acumulados a lo largo de todo un año de producción de energía eléctrica en los Estados Unidos, sobre la base de que su origen fuera totalmente nuclear *(véase la ilustración inferior de la página opuesta).* En dicho gráfico se puede ver que, para un período comprendido entre los ocho y los cuatrocientos años tras la operación de reprocesamiento, la contribución predominante a la emisión total de rayos gamma se debe al cesio-137 y al producto inmediato de su desintegración, el boro-137. Durante este período de cuatro siglos, el peligro que representan los rayos gamma disminuye en más de cuatro órdenes de magnitud.

Con el fin de comprender el significado del peligro potencial que supone esta cantidad de radiación gamma, vamos a considerar lo que sucedería si la fuente de radiación estuviera distribuida sobre toda la superficie de los Estados Unidos. El número de cánceres fatales que se producirían en este caso podría equivaler a varios millones. Evidentemente, el material que origina esta radiación debe ser manejado y confinado con gran cuidado. Por otro lado, los rayos gamma resultan atenuados en un factor 10 al atravesar un espesor de 30 centímetros de roca o tierra, de forma tal que el peligro desaparece cuando los residuos en cuestión se entierran a gran profundidad bajo el suelo.

Una medida del cuidado con que deben manejarse los recipientes que contienen los residuos radiactivos se obtiene al considerar que si un hombre permaneciera durante 10 minutos a una distancia de 10 metros de uno de tales recipientes sin protección alguna, recibiría una dosis de 500 rem (fatal en un 50 por ciento de los casos). Sin embargo, desde el punto de vista técnico, no existe ninguna dificultad en proporcionar un apantallamiento tal que permita manejar los recipientes de los residuos por control remoto de una forma segura.

Si cualquiera de los residuos radiactivos llegase a entrar en el cuerpo humano, sus efectos biológicos resultarían acentuados, puesto que la radiación emitida bombardearía los tejidos humanos en todas direcciones y que la correspondiente exposición subsistiría durante algún tiempo. En consecuencia, debemos considerar los dos caminos de entrada más importantes: la ingestión y la inhalación. El peligro de ingestión se puede evaluar en función del número de dosis causantes de cáncer que existirían en los residuos producidos en los Estados Unidos durante un año por un sistema de energía eléctrica de origen totalmente nuclear *(véase la ilustración de la página 14).* En esa gráfica, el valor de 16^6 en ordenadas, que corresponden a un valor de 10^4 en abscisas, por ejemplo, significa que si los residuos fueran ingeridos por la gente, después de transcurridos 10.000 años tras el procedimiento, cabría esperar la aparición de un millón de casos de cáncer fatales. Aunque la anterior evaluación, que constituiría "el peor de los casos", parece presuponer que están implicadas en este supuesto muchos millones de personas, este requisito no es estrictamente necesario dada la relación lineal que existe entre la dosis y los efectos cuya ocurrencia se suele tomar en consideración para proceder al cálculo de estos riesgos por radiación. La obtención de dicho gráfico es bastante compleja, puesto que es necesario conocer la probabilidad de que cada especie radiactiva atraviese las paredes intestinales para llegar al sistema circulatorio, la probabilidad de transferencia desde la sangre a cada órgano del cuerpo humano, el tiempo que cada sustancia radiactiva permanece en cada órgano, la energía de la radiación emitida por la sustancia y la fracción de dicha energía que resulta absorbida por el órgano, la masa de éste, los efectos biológicos relativos de los diferentes tipos de radiación emitidos y, finalmente, el riesgo de cáncer por unidad de radiación absorbida (en rem).

Ahora bien, dado que la posibilidad de una ingestión directa de todo este material radiactivo por parte de la gente no es una hipótesis realista, vamos a analizar las consecuencias a que daría lugar el hecho de que los residuos en cuestión se vertieran en forma soluble y al azar en todos los ríos de los Estados Unidos. En relación con este supuesto, que plantea una situación a la que podría conducir un manejo totalmente irresponsable de los desechos radiactivos, el gráfico muestra que podría producirse un millón de muertos. Aunque es improbable que nadie sugiera dicho vertido, en cualquier caso resulta evidente que éste no es un método aceptable de eliminar los residuos.

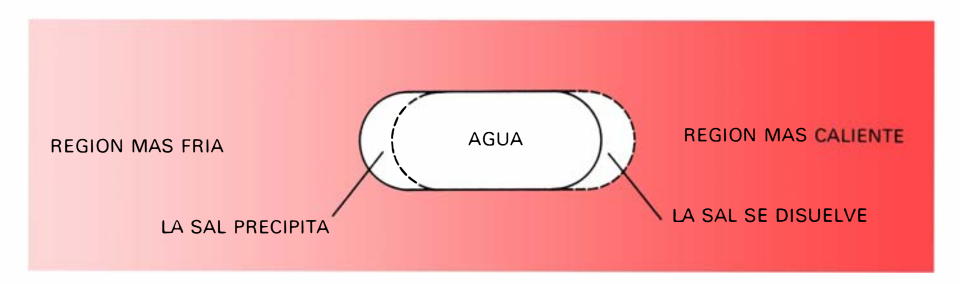


TEMPERATURA MAXIMA MEDIA de la roca situada justo por encima y por debajo del nivel en el que está enterrado un recipiente de residuos radiactivos, que se alcanzaría una vez transcurridos 40 años a partir del momento del enterramiento, cuando la temperatura media en el nivel del enterramiento en cuestión hubiera aumentado en unos 140° C. Si el recipiente de los residuos estuviera enterrado en sal, los aumentos serían menores. 100 pies equivalen a 30,480 metros.

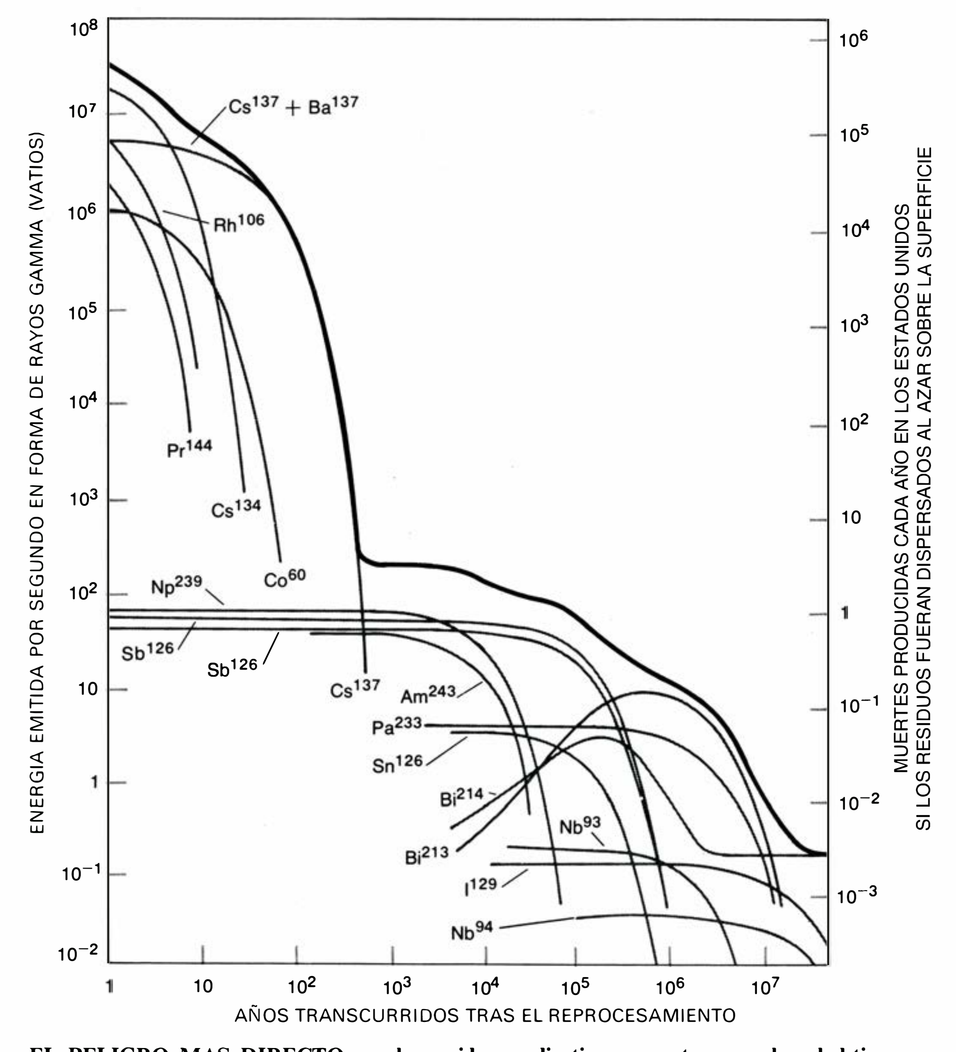
Al evaluar el peligro de inhalación, el efecto más importante por considerar es la inducción de cánceres de pulmón *(véase la figura de la página 15)*. Nuevamente aquí el gráfico muestra las consecuencias de una situación hipotética que se podría originar al manipular los residuos radiactivos sin el más mínimo cuidado: su dispersión al azar en forma de polvo fino sobre todo el suelo de los Estados Unidos, permitiendo además que fueran arrastrados por el viento.

En algunas declaraciones públicas se subrayan los peligros potenciales que representan las escalas de estos gráficos, que se refieren al número de casos de cáncer que cabría esperar si todos los materiales radiactivos considerados fueran ingeridos o inhalados por la gente. Por ejemplo, con frecuencia se oye decir que en los residuos nucleares hay suficiente radiactividad como para matar a mil millones de personas. Para situar este tipo de afirmaciones dentro de sus justos términos es interesante comparar los peligros conocidos de los residuos nucleares con los de otras sustancias nocivas utilizadas en grandes cantidades en los Estados Unidos *(véase la figura de la página 16)*. Esta comparación demuestra que los residuos radiactivos no son las únicas sustancias peligrosas que existen. Es más, generalmente se insiste en el hecho de que los residuos radiactivos mantienen su peligrosidad durante largo tiempo, olvidando en este sentido que el bario y el arsénico, no radiactivos, son venenos eternamente. Se podría argüir también que las otras sustancias peligrosas ya existen, en tanto que los residuos nucleares constituyen un peligro de reciente creación. Sin embargo, los Estados Unidos importan aproximadamente la mitad del suministro de bario y arsénico y, en consecuencia, podemos decir que estas sustancias peligrosas también son introducidas "artificialmente" en el medio ambiente de dicho país. Otra diferencia importante al respecto, que frecuentemente pasa inadvertida, consiste en el hecho de que los venenos químicos no son cuidadosamente enterrados a gran profundidad en el subsuelo, como está programado hacerlo en el caso de los residuos nucleares; de hecho, la mayor parte del arsénico se utiliza como herbicida y, por consiguiente, se suele dispersar sobre el suelo en regiones en donde se cultivan alimentos.

Todas las representaciones cuantitativas de los peligros potenciales carecen virtualmente de significado a menos que se tengan en cuenta las posibles vías por las que estos agentes peligrosos pueden alcanzar al hombre. Por tanto, voy a ocuparme ahora de esta cuestión. Generalmente, se está de acuerdo en afirmar que el peligro más importante que presentan los residuos radiactivos para la salud tiene su origen en la posibilidad de que las aguas subterráneas se pongan en contacto con los residuos enterrados, los disuelvan, los hagan atravesar las rocas y el suelo que los cubren y los lleven por último hasta los alimentos y las fuentes hidrológicas. La exposición humana a tales residuos tendría lugar entonces a través de su ingestión. El análisis del anterior proceso conduce



EN UNA MINA DE SAL, el calor de los recipientes con residuos produciría la migración de pequeñas bolsas de agua en la dirección de las temperaturas más altas, puesto que la sal tendería a disolverse en el extremo más caliente *(derecha)* **y a precipitar en el lado más frío** *(izquierda)*.

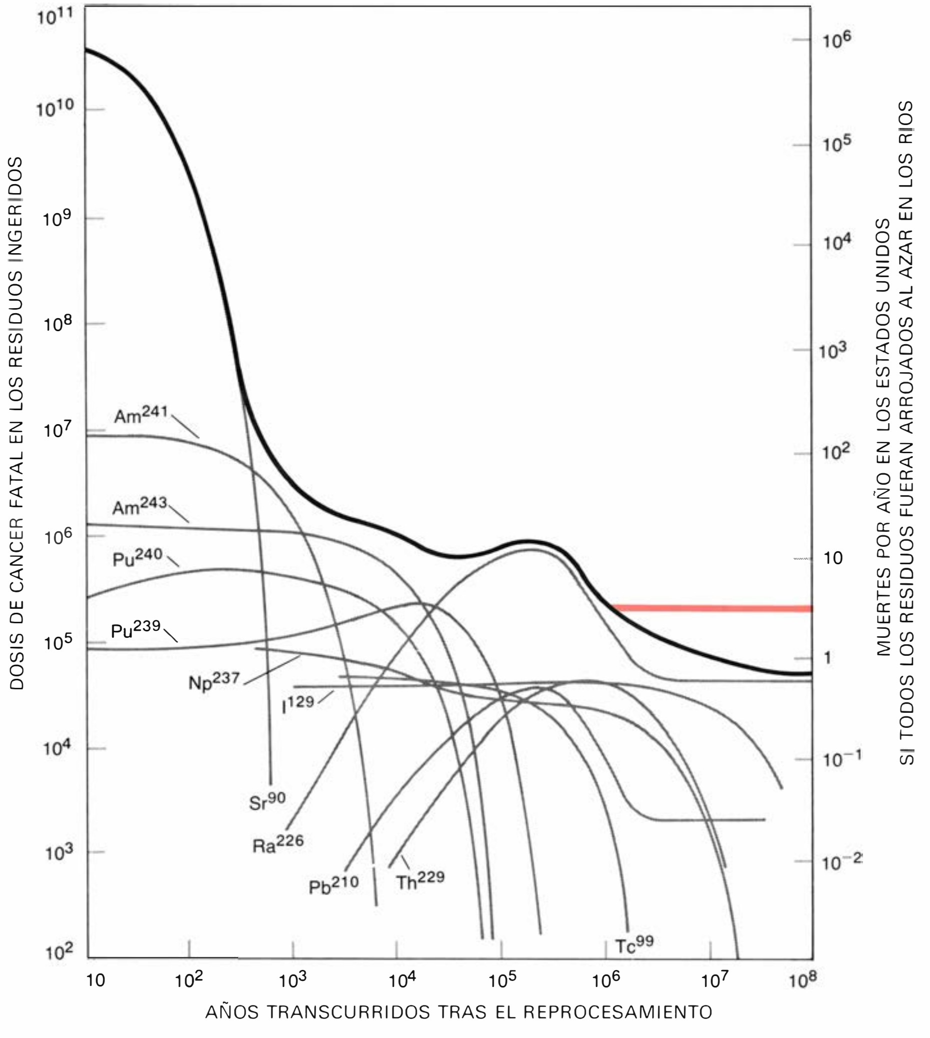


EL PELIGRO MAS DIRECTO que los residuos radiactivos presentan para la salud tiene su origen en la radiación gamma que se emite en la desintegración nuclear. En la mayoría de los casos, el daño biológico que produce un rayo gamma es aproximadamente proporcional a su energía. En la escala de la izquierda de la presente figura se han representado las energías de los rayos gamma emitidas por segundo por los diferentes isótopos radiactivos de los residuos que se producirían a lo largo de todo un año en un sistema de energía eléctrica totalmente nuclear en los Estados Unidos (suponiendo que existieran 400 centrales de 1000 megavatios cada una). La curva en negro muestra que entre los 8 y los 400 años tras el reprocesamiento, el peligro total que supone la radiación gamma disminuye en más de cuatro órdenes de magnitud. La escala de la derecha se refiere al número total de cánceres fatales que cabría esperar cada año si la fuente de esta radiación gamma estuviera distribuida al azar sobre toda la superficie del territorio de los Estados Unidos.

a la conclusión de que el peligro que supone la ingestión de material radiactivo es alto al principio, pero mucho menor una vez han transcurrido unos pocos centenares de años. Se puede calcular que, al cabo de 600 años, una persona tendría que ingerir unos 200 gramos de residuos radiactivos para que tuviera una probabilidad del 50 por ciento de sufrir un cáncer mortal. Resulta razonable concluir que es muy importante que los residuos estén aislados del contacto humano durante los primeros centenares de años. Voy a ocuparme en primer lugar de este problema y más adelante estudiaré el caso de largos períodos de tiempo.

Cuando a la gente se le hace saber que los residuos nucleares se deben aislar durante centenares de años, su respuesta inmediata es decir que esto es virtualmente imposible: las instituciones sociales, los sistemas políticos y las estructuras que erige el hombre no suelen durar tanto tiempo. Sin embargo, esta respuesta se basa en la experiencia sobre el medio ambiente en la superficie terrestre y lo que se discute ahora se refiere a las formaciones rocosas situadas a 600 metros bajo la superficie. En este medio tan peculiar, los intervalos de tiempo significativos para cualquier cambio sustancial son del orden de millones de años.

Además de la seguridad que supone el propio medio subterráneo a gran profundidad, los diferentes retardos intrínsecos de cualquier proceso de liberación plausible suponen una apreciable protección adicional durante el crítico período de los primeros centenares de años. La más importante de estas salvaguardas adicionales está relacionada con la selección de un lugar de almacenamiento adecuado, cuyo estudio geológico debe garantizar no sólo la inexistencia de corrientes de agua subterráneas en el momento actual, sino también que presumiblemente estará libre de ellas en un futuro muy largo. En términos geológicos, un período de algunos centenares de años es poco tiempo y, por tanto, el grado de fiabilidad de este género de predicciones es muy elevado. Puesto que los sistemas hidrológicos subterráneos pueden resultar alterados por los terremotos, sólo deben seleccionarse aquellas zonas que sean tectónicamente estables. Las formaciones salinas ofrecen una seguridad adicional en este sentido, debido a que cuando la sal se somete a presión, fluye plásticamente. En consecuencia, la sal es capaz de rellenar las grietas que se forman como resultado de la actividad tectónica. Esta propiedad de la sal hace desaparecer también las cicatrices producidas en las operaciones de enterramiento, con lo cual los recipientes en cuestión quedan totalmente sellados en el seno de gigantescas masas cristalinas.



SI TODOS LOS RESIDUOS FUERAN INGERIDOS, los efectos biológicos sobre la población humana de los Estados Unidos serían considerables. Como muestra esta gráfica, el número de dosis causantes de cáncer en los residuos producidos durante un año por un sistema de energía eléctrica totalmente nuclear en los Estados Unidos sería tal que, si todos estos residuos, después de transcurrir 10.000 años, fueran convertidos en una forma digerible y fueran ingeridos por la gente, se produciría un millón de cánceres fatales *(escala de la izquierda)*. Si los residuos fueran convertidos en una forma soluble e inmediatamente después de su reprocesamiento fueran arrojados al azar a los ríos de los Estados Unidos, el resultado sería de un millón de muertos *(escala de la derecha)*.

No obstante, vamos a suponer que el agua consiga penetrar en las grietas que, a pesar de todo, puedan existir en las rocas en que los residuos estén enterrados. ¿Qué sucedería entonces? Desde luego, la roca seleccionada debería ser impermeable al agua, de forma que transcurriría un cierto tiempo antes de que la roca se lixiviara y el vidrio con los residuos quedara expuesto al agua. A primera vista, puesto que la sal es soluble en el agua, se podría creer que este proceso no exigiría mucho tiempo, pero hemos de tener presente que, en realidad, la cantidad de agua que existe a gran profundidad no es muy grande, mientras que la masa de sal es enorme. Por ejemplo, si se consiguiera de alguna forma que toda el agua subterránea que fluye actualmente en la región de Estados Unidos en que se propone situar el almacén federal de residuos, en Nuevo México, circulara a través de la sal, serían necesarios 50.000 años para que la sal que rodea el depósito de residuos radiactivos producidos a lo largo de un año se disolviera totalmente y desapareciera de allí.

Un tercer retardo tiene su origen en el tiempo que exigiría la lixiviación del vidrio en el que están incluidos los residuos. Existe alguna incertidumbre en relación con esta cuestión. El problema resulta complicado por el hecho de que la velocidad con que tiene lugar esta lixiviación aumenta rápidamente con la temperatura, pero parece relativamente claro que la baja velocidad con que el vidrio se puede lixiviar ofrecerá una protección suficiente al menos durante algunos centenares de años. Si los estudios que se llevan a cabo actualmente sobre las velocidades de lixiviación in-

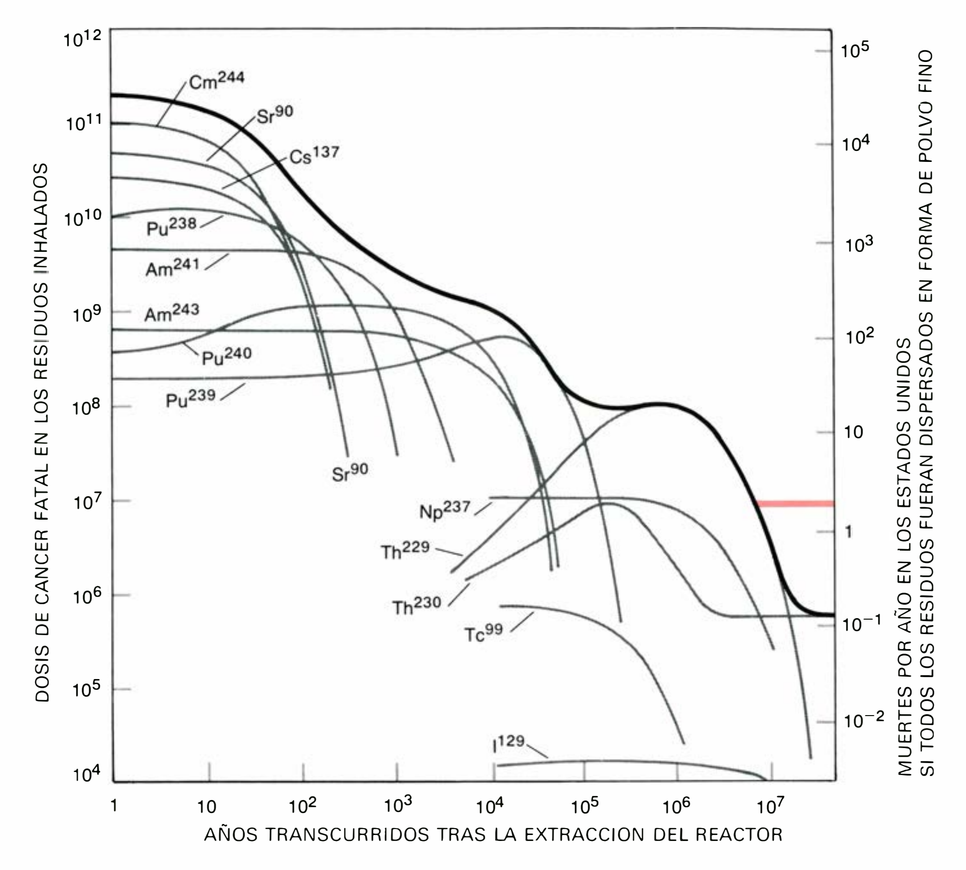
dicaran lo contrario, no resultaría demasiado difícil ni demasiado caro utilizar cerámicas u otros materiales más resistentes que el vidrio para la incorporación de los desechos radiactivos.

Un cuarto retardo se refiere al tiempo que el agua necesita generalmente para alcanzar la superficie terrestre. Las velocidades de flujo típicas son inferiores a los 30 centímetros por día y las distancias a recorrer pueden llegar a ser de decenas o centenares de kilómetros. Para desplazarse 100 kilómetros a una velocidad de 30 centímetros por día se necesitan unos 1000 años.

Por otra parte, los residuos radiactivos no se moverían con la misma velocidad que el agua, aun cuando estuvieran disueltos en ella. Dichos residuos estarían sometidos a un autofiltrado en virtud de procesos de cambio iónico. Por ejemplo, un ion de estroncio radiactivo se intercambiaría frecuentemente con un ion de calcio de las rocas, con el resultado de que el ion de estroncio permanecería fijo y el ion de calcio se movería con el agua. El ion de estroncio volvería eventualmente a la solución, pero debido a la ocurrencia continua de este tipo de procesos el estroncio radiactivo se movería 100 veces más lentamente que el agua, con lo cual invertiría quizás 100.000 años en alcanzar la superficie. Para los otros componentes significativos de los residuos radiactivos este retraso es todavía mayor.

Como consecuencia de todos estos retardos, existe una seguridad extremadamente alta de que muy poca cantidad de los residuos escapará por la vía de las aguas subterráneas durante los primeros centenares de años tras el enterramiento, es decir, cuando son más peligrosos. De hecho, se cree que los retrasos ofrecerán una protección sustancial durante cientos de miles de años. Sin embargo, en la subsiguiente discusión del peligro potencial a largo plazo, no tomaré en consideración este resultado.

Como hemos visto, la dosis "letal al 50 por ciento" de los residuos radiactivos ingeridos una vez transcurridos 600 años es de unos 200 gramos. A la vista de estas cifras, dichas sustancias difícilmente pueden ser consideradas como un veneno potente; su peligrosidad parece particularmente remota si se considera que el material está cuidadosamente enterrado en una forma de baja solubilidad, aislado de las aguas subterráneas y situado a 600 metros de profundidad bajo la superficie terrestre. En nuestros hogares solemos guardar muchos venenos más potentes que éste. Sin embargo, dado que los residuos nucleares mantienen su toxicidad durante un tiempo muy largo, su existencia supondrá un peligro constante.



SI TODOS LOS RESIDUOS FUERAN INHALADOS, el efecto más importante para la salud sería la inducción de cánceres de pulmón. La escala de la izquierda muestra el número total de dosis causantes de cáncer que habría en los residuos producidos durante un año por un sistema de energía eléctrica totalmente nuclear en los Estados Unidos. La escala de la derecha muestra el número de muertes que cabría esperar por vía de la inhalación si todos estos residuos se dispersaran al azar en forma de polvo fino sobre toda la superficie de dicho país. Tanto en este gráfico como en el de la página anterior, la corta línea de color que aparece a la derecha representa el peligro a largo plazo que supone para la salud la radiactividad natural de los minerales del uranio que serían consumidos en el citado sistema de producción de energía eléctrica de origen nuclear.

Para estudiar este riesgo a largo plazo, vamos a evaluar la probabilidad de que los desechos escapen al medio ambiente. ¿Cómo se podría llevar a cabo esta estimación? Una forma consiste en hacer una comparación entre un átomo de residuos nucleares enterrados a una profundidad de 600 metros y un átomo de radio típico de la roca o el suelo, situado encima del recipiente que contiene los residuos, y suponer que el átomo de los residuos no tiene una probabilidad mayor que el átomo de radio para escapar del lugar que ocupa y llegar a alcanzar finalmente a un ser humano. Esto podría ser una hipótesis prudente, puesto que "la roca o suelo situados sobre el recipiente de los residuos" incluye el material más próximo a la superficie, donde la erosión del viento, la escorrentía superficial, los ciclos de congelación-deshielo y la vegetación, entre otros factores, se muestran particularmente activos.

Aunque resulta difícil calcular la probabilidad de escape de un átomo de radio para una región en particular, en cambio sí se puede evaluar la probabilidad media de escape para todo el territorio de los Estados Unidos. Para que esta comparación tenga significado se puede suponer que los residuos están enterrados con una distribución uniforme en todo el país, pero, puesto que se trata de calcular valores medios, se llega a un resultado equivalente a éste suponiendo que dichos residuos están enterrados en lugares al azar de todo el país y siempre a la misma profundidad. Esta hipótesis es claramente prudente: cabe pensar que haciendo uso de toda la información de que se dispone desde los puntos de vista geológico, hidrológico y litológico, el lugar de enterramiento que se seleccione siempre será mucho más seguro que otro elegido al azar.

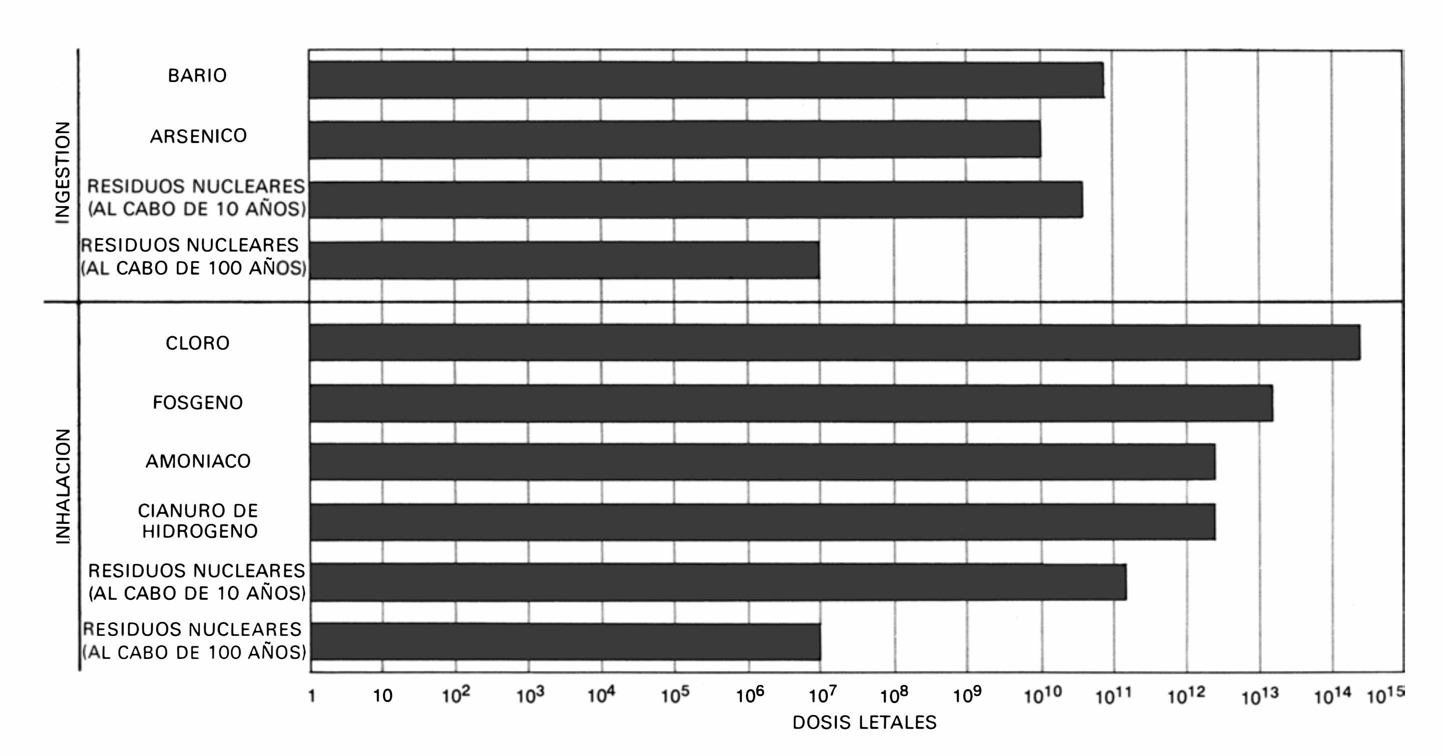
Sobre la base de estas dos hipótesis –enterramiento al azar y la misma probabilidad de escape para los átomos de radio y de los residuos– únicamente necesitamos evaluar la probabilidad media de que escape un átomo de radio situa-

do en los 600 metros más superficiales de la corteza terrestre en los Estados Unidos. Uno de los posibles métodos de cálculo consta de dos etapas: primero se determina la probabilidad de que un átomo de radio escape del suelo hasta los ríos y a continuación se multiplica este resultado por la probabilidad de que una determinada muestra de agua sea ingerida por un ser humano. La concentración media de radio en los ríos (dos gramos en cada 10^{13} litros) y el flujo total anual de agua en los ríos de los Estados Unidos ($1,5 \times 10^{15}$) se consideran datos conocidos. La cantidad de radio transferida desde el suelo hasta los ríos es igual al producto de estas dos cifras, es decir, 300 gramos. Puesto que el radio es un producto de la desintegración radiactiva del uranio, a partir de la concentración media de uranio en las rocas (2,7 partes por millón), se puede estimar fácilmente que en los 600 metros más superficiales de la corteza de los Estados Unidos existen $1,2 \times 10^{10}$ gramos de radio. La probabilidad de transferencia anual, es decir, la relación entre la cantidad transferida anualmente y la cantidad total, es igual a 0,000000025. El inverso de este número, 40 millones de años, es el tiempo de vida media de la roca en los 600 metros a que nos estamos refiriendo. En consecuencia, cada átomo de residuos nucleares enterrados tiene una probabilidad entre 40 millones de escapar cada año. Por otra parte, se calcula que una parte de cada 10.000 de las corrientes de agua de los Estados Unidos son ingeridas por los seres humanos, pero debido a los diferentes procesos de purificación a que ésta se somete, del radio que existe en los ríos sólo se ingiere una fracción de 1,5 partes de cada 100.000. Si multiplicamos este número por la probabilidad anual de escape a los ríos que hemos calculado antes ($2,5 \times 10^{-8}$), se obtiene fácilmente la probabilidad de transferencia total anual de un átomo de radio desde el suelo a los seres humanos. Esta probabilidad es del orden de 4 en 10 billones.

Este cálculo presenta al menos dos defectos, puesto que ignora la transferencia a través de los alimentos y supone que todo el radio ingerido es asimilado por el cuerpo. El primero de estos factores reduce la probabilidad de transferencia; el segundo la aumenta. Estos problemas se pueden evitar y el cálculo se puede simplificar si estimamos el número de cánceres humanos que la ingestión de radio induce anualmente (12) y dividimos este número por el número de dosis causantes de cáncer que existen en los 600 metros de corteza terrestre que estamos considerando (30 billones). La primera cantidad se obtiene como resultado de las medidas reales de la cantidad de radio que existe en los cadáveres, junto con las estimaciones aceptadas generalmente del riesgo de que una persona contraiga cáncer debido al radio. La probabilidad de transferencia anual que se obtiene por este método coincide con el valor a que conduce el método anterior. En consecuencia, resulta razonable multiplicar la escala de la dosis en el gráfico de ingestión que se reproduce en la página 14 por 0,000,000,000,000,4 (es decir, 4 posibilidades por cada 10 billones), con el fin de obtener el número de muertes que cabría esperar anualmente por causa de los residuos nucleares que originaría un sistema de producción de energía eléctrica nuclear en los Estados Unidos.

Todo cuanto antecede significa que, tras los primeros centenares de años de almacenamiento de residuos nucleares (durante los cuales estaríamos protegidos por los diferentes factores de retardo que hemos discutido antes), se podría esperar, a lo sumo, una cifra del orden de 0,000001 muertes por año. Cuando esta tasa se considera a título acumulativo, conduce a 0,4 muertes durante el primer millón de años y 4 muertes más durante los 100 millones de años siguientes.

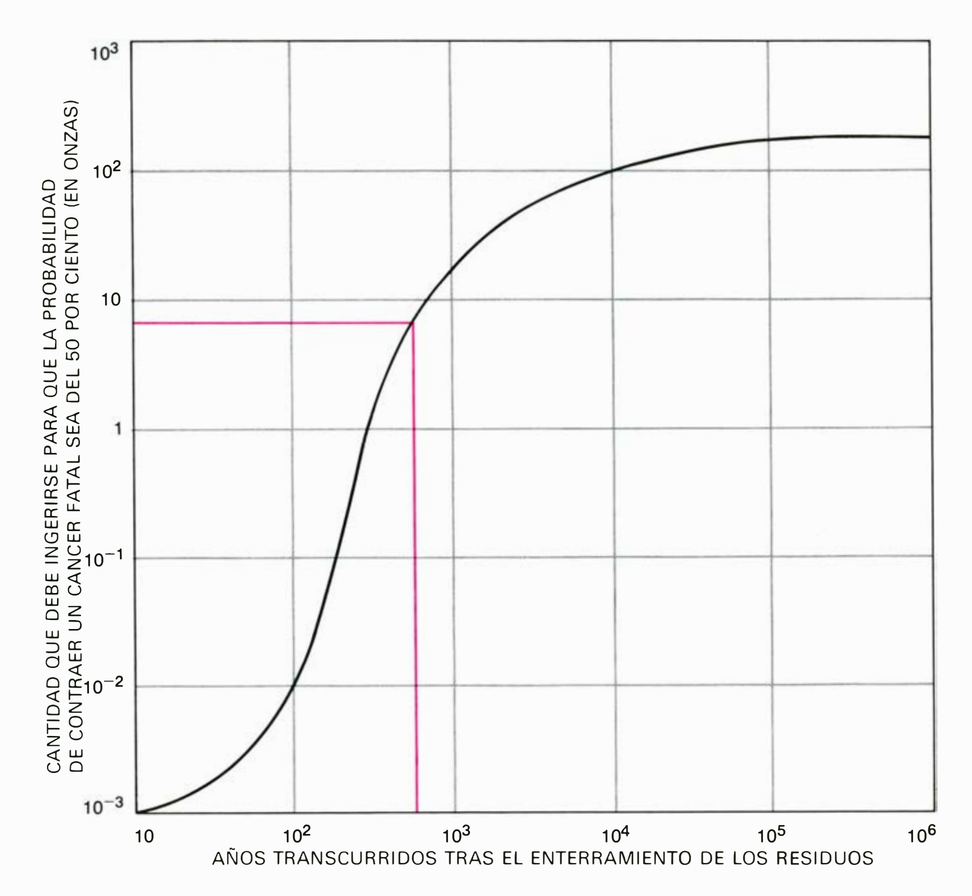
Cuando se consideran los efectos que la radiactividad tiene sobre la salud humana durante períodos de tiempo tan grandes, se debería tener en cuenta también el hecho de que las centrales nucleares queman uranio, que en la actualidad constituye la principal fuente de radiación para el hombre. Por ejemplo, el uranio que existe en el subsuelo de los Estados Unidos es la fuente del radio,



COMPARACION DE LOS PELIGROS que representan para la salud los residuos radiactivos de alta actividad procedentes de reactores nucleares y otras sustancias nocivas utilizadas ampliamente en los Estados Unidos. Demuestra que no sólo son peligrosos los residuos nucleares. Por otra parte, los venenos químicos no son enterrados cuidadosamente como está programado hacerlo con los residuos nucleares; de hecho, la mayor parte del arsénico se utiliza como herbicida y, por tanto, se dispersa por el suelo en regiones en donde se cultiva alimentos.

que cada año produce 12 cánceres fatales en este país. Suponiendo que el uranio natural estuviera enterrado de una forma tan segura como lo estarán los residuos nucleares, sus eventuales efectos sobre la salud serían mayores que los de dichos residuos. En otras palabras, una vez transcurrido un tiempo del orden del millón de años, como consecuencia del consumo de uranio se salvarían más vidas que las que se perderían por efecto de los residuos radiactivos.

Ahora bien, el uranio que se extrae actualmente de las minas no está situado a una profundidad media de 600 metros, sino bastante más próximo a la superficie. Este elemento es una fuente de radón, un gas altamente radiactivo originado en la desintegración del radio, que puede escapar a la atmósfera. El gas radón es la fuente más importante de radiación en el medio ambiente y, de acuerdo con los métodos de cálculo utilizados aquí, se puede considerar que es el responsable de miles de muertes por año en los Estados Unidos. Si se tiene en cuenta este factor adicional, se llega a la conclusión de que al quemar uranio en los reactores nucleares se salvan unas 50 vidas por millón de años por cada año de producción de energía eléctrica de origen totalmente nuclear en los Estados Unidos. Esta cifra es más de 100 veces mayor que las 0,4 vidas que se podrían perder por efecto de los residuos radiactivos enterrados.



EL PELIGRO que supone la ingestión de residuos es muy grande al principio, pero disminuye mucho al cabo de algunos centenares de años según puede demostrarse. Como indica este gráfico, después de 600 años, una persona tendría que ingerir aproximadamente 200 gramos de residuos para que la probabilidad de contraer un cáncer fatal fuera del 50 por ciento. Aunque es importante que los residuos se aíslen del contacto humano durante centenares de años, los cálculos muestran que tal aislamiento es menos imperativo con posterioridad. Una onza equivale a 38,350 gramos.

En consecuencia, desde una perspectiva temporal a gran escala, la energía nuclear debe ser considerada como una forma de eliminar la radiactividad de la tierra. Este hecho se pone claramente de manifiesto si se considera que cada átomo de uranio está abocado eventualmente a la desintegración, con la emisión de ocho partículas alfa (núcleos de helio), cuatro de las cuales se emiten como consecuencia de la formación de gas radón. A través del acto de respirar, la naturaleza ha proporcionado una forma simple para que el radón penetre en el cuerpo humano. En los reactores nucleares, los átomos de uranio se convierten en dos átomos de productos de fisión, que se desintegran únicamente por emisión de rayos beta (electrones) y, en algunos casos, rayos gamma. Un 87 por ciento de estos procesos de emisión tiene lugar incluso antes de que el material abandone el reactor; además, los rayos beta y los rayos gamma son típicamente 100 veces menos perjudiciales que las partículas alfa, debido a que sus energías son menores (en un factor de 10) y depositan dicha energía en los tejidos de forma menos concentrada, lo cual trae consigo que su eficacia biológica sea 10 veces menor. En consecuencia, a largo plazo, el hecho de quemar uranio en los reactores supone una reducción del peligro que la radiactividad supone para la salud humana.

En relación con esta cuestión, es interesante advertir que el carbón contiene por término medio 1,5 partes por millón de uranio, que se libera al medio ambiente cuando el carbón se quema. El gas radón del uranio liberado durante un año por un sistema productor de electricidad totalmente basado en el carbón en los Estados Unidos produciría 1000 muertes cada millón de años; esta cifra es tres órdenes de magnitud mayor que el resultado obtenido anteriormente para los residuos de un sistema energético totalmente nuclear.

El riesgo de ingerir residuos radiactivos con la comida o el agua es muy bajo, pero ¿qué podemos decir acerca del riesgo de inhalarlos en forma de partículas en suspensión en el aire? Los peligros potenciales de inhalar tales materiales son mucho menores y más duraderos que los peligros de ingerirlos. Sin embargo, es difícil imaginar cómo los residuos nucleares enterrados podrían resultar liberados en forma de partículas en suspensión en el aire. Ni siquiera la explosión de las bombas nucleares más grandes ideadas hasta ahora afectaría al material enterrado a una profundidad de 600 metros. Los meteoritos de tamaño suficiente para ello son extremadamente raros, de forma que sus efectos medios probables serían un millón de veces menores que los que produce la ingestión. Las erupciones volcánicas en regiones tectónicamente tranquilas son también muy raras; por otra parte, como dichas erupciones afectan a superficies relativamente pequeñas, sus efectos serían todavía menores.

La liberación de los residuos a través de las aguas subterráneas podría dar lugar a que una pequeña fracción de la radiactividad llegara a la superficie y ulteriormente se dispersara allí, pero los cálculos llevados a cabo en este sentido demuestran que para que este camino fuera tan peligroso como el de la ingestión debería afectar a la totalidad de los

residuos. Los desechos dispersados en la superficie constituirían también un peligro de radiación externa en virtud de los rayos gamma que emiten, pero el correspondiente cálculo demuestra que este peligro es también menor que el de la ingestión.

Ninguna de las estimaciones que he dado hasta ahora tiene en cuenta la posible liberación de los residuos nucleares por la acción del hombre. Por tanto, vamos a considerar esta posibilidad. Los residuos enterrados no serían un objetivo atractivo para los saboteadores debido a la gran cantidad de tiempo, esfuerzo, equipo y riesgo personal que serían necesarios para su extracción. Sólo es necesario tomar en consideración su liberación como consecuencia de una intrusión humana accidental, por ejemplo, por perforaciones o trabajos de minería. Los planes actuales presuponen que el gobierno sería el propietario de los lugares de enterramiento y el responsable de mantener la vigilancia y el control de los mismos. En consecuencia, este problema se presentaría únicamente si se produjera un colapso total de nuestra civilización. Uno de los requisitos que se tienen en cuenta al proceder a la elección de un lugar de almacenamiento es la ausencia de minerales valiosos y de la perspectiva de encontrarlos. (De hecho, la causa principal del retraso en el desarrollo del emplazamiento de Nuevo México es la posibilidad de que contenga depósitos de potasa.) Sin embargo, si en esta región se llevaran a cabo al azar perforaciones de prospección con una intensidad análoga a las que se realizan en los enclaves petrolíferos de los Estados Unidos, los efectos medios serían todavía mucho menores que los correspondientes a una liberación de residuos vía las aguas subterráneas. Si en dicha región hubiera explotaciones mineras (presumiblemente en relación con minerales que ahora no se consideran valiosos), las operaciones tendrían que realizarse a una escala comparable a la que representa toda la extracción de carbón en los Estados Unidos para que sus efectos igualaran a los de una liberación a través de las aguas subterráneas.

En relación con la posibilidad de que la intrusión se realice mediante actividades mineras, parecería que la elección de la sal como medio de enterramiento fuese muy desafortunada, dado que la sal se explota muy ampliamente. Sin embargo, la cantidad de sal que existe en el subsuelo es tan grande que procediendo al azar, un área determinada podría no ser explotada durante decenas de millones de años. La probabilidad de liberación a través de esta vía es comparable con la que tendría lugar a través de las aguas subterráneas, excepto en el hecho de que los residuos estarían en forma insoluble y, si fueran ingeridos, su probabilidad de asimilación por el hombre sería mucho menor. Podríamos suponer que uno de los posibles caminos de ingestión fuera a través del uso de la sal en las comidas, pero solamente un uno por ciento de la sal extraída de las minas de los Estados Unidos se utiliza de esta forma y, además, esa sal se somete a un proceso de purificación en el que se separan sus componentes insolubles.

De este modo, la exposición correspondiente se reduciría hasta llegar a ser aproximadamente igual a la que se derivaría del uso de la sal en procesos industriales. En conclusión, la probabilidad de liberación de los residuos nucleares como consecuencia de una intrusión humana es menor que la de su liberación a través de las aguas subterráneas.

Frecuentemente se dice que, por el hecho de producir desechos radiactivos, nuestra generación transfiere un gravamen injustificado a las generaciones futuras, al exigirles que se protejan contra su liberación. Deberíamos reconocer, en primer lugar, que la estimación de los efectos que los residuos nucleares producirían para la salud –esas 0,4 muertes posibles por año de energía eléctrica totalmente nuclear a que me he referido anteriormente– está basada en una ausencia total de precauciones.

La estimación se fundaba en una comparación con el radio, y nadie está vigilando los depósitos de radio de Estados Unidos para evitar que llegue a los ríos en virtud de diferentes operaciones de movimiento de tierras. En consecuencia, la vigilancia de los residuos nucleares enterrados reduciría todavía más esa cifra ya de por sí baja.

Aun en el caso de que la vigilancia se considerara aconsejable, no sería ni muy cara ni muy difícil. Una vez que el almacén hubiera sido clausurado, dicho control consistiría solamente en hacer inspecciones periódicas en la superficie –en un área de unos 25 kilómetros cuadrados para los residuos producidos durante 1000 años de energía eléctrica totalmente nuclear– para estar seguros de que las señales de alerta están en debidas condiciones y comprobar que no

se ha practicado ningún tipo de perforación profunda. Además de esto, de vez en cuando se podrían tomar muestras de agua de los ríos y pozos próximos para detectar cualquier aumento de radiactividad en los mismos. Vemos así que, para mantener bajo vigilancia todos los residuos acumulados durante 1000 años de producción de energía eléctrica totalmente nuclear en los Estados Unidos, bastaría utilizar una sola persona.

Quizá la mejor forma de comprender lo que significa realmente el gravamen que legamos a nuestros descendientes al almacenar residuos nucleares sea compararlo con otros gravámenes que también les transmitimos. Probablemente el peor de todos ellos sea el originado por nuestro consumo de los recursos minerales de la tierra. Dentro de unas pocas generaciones habremos consumido todos los recursos económicamente rentables de cobre, estaño, zinc, mercurio, plomo y docenas de otros elementos, dejando a nuestros descendientes menos opciones para que exploten todos esos materiales. Por otra parte, estamos quemando carbón, petróleo y gas a razón de millones de toneladas cada día, privando a nuestros descendientes no sólo de combustibles, sino también de materias primas para fabricar plásticos, productos químicos orgánicos y farmacéuticos y otros materiales útiles. Seguramente estos inconvenientes son más serios que los que puedan derivarse de un adecuado enterramiento de los residuos radiactivos nucleares.

Lo que hace esta comparación particularmente pertinente es que la única forma en que podemos compensar a nuestros descendientes por los materiales que les estamos denegando es legarles una tecnología que les permita vivir con un confort razonable sin estos materiales. La clave para alcanzar dicha tecnología debe ser una energía abundante y barata. Con energía abundante y barata y un grado razonable de inventiva, el hombre puede encontrar sustitutos para casi todo: cantidades virtualmente ilimitadas de hierro y aluminio por lo que respecta a los metales, hidrógeno por lo que se refiere a los combustibles, etcétera. Sin energía abundante y barata, las opciones posibles disminuyen considerablemente y sería necesario volver a una existencia bastante primitiva. Parece evidente que los que hoy estamos vivos debemos a nuestros descendientes una fuente de energía abundante y barata. La única fuente de estas características que hoy por hoy podemos garantizar es la fisión nuclear.

El aceite de oliva

La gran transformación experimentada por la producción de grasas desde fines del siglo XIX sitúa actualmente el costo del aceite de oliva por encima del de otros aceites, con los que sólo puede competir en calidad

Juan M. Martínez Moreno

Según la mitología griega, la diosa Pallas, al crear el olivo, venció en una especie de torneo olímpico a Poseidón, por lo que Zeus le confirió el patrocinio de la ciudad de Atenas; pero el olivo seguramente existía ya, porque la paloma que anunció a Noé el descenso de las aguas (*Génesis* 8-9) traía en su pico un ramo de olivo... Hace milenios que se cultiva el olivar y que el dorado jugo oleoso de las aceitunas sirve de alimento en los países ribereños del Mediterráneo, integrándose en sus ecosistemas hasta el punto de que, si el olivo forma parte del paisaje de estas regiones, su aceite ha contribuido sin duda a conformar algunas de las peculiaridades y hábitos alimentarios de sus gentes.

No todo, empero, es bueno en el olivar: su cultivo exige largos años de espera, duras labores y protección contra plagas muy diversas hasta verlo fructificar, sus cosechas son muy variables y la recogida de sus frutos exige una mano de obra barata y estacional difícil de compaginar con la prosperidad económica y el progreso social a que aspiran todos los pueblos.

El desarrollo tecnológico que tanto ha beneficiado a otras ramas de la agricultura no ha logrado vencer por completo las dificultades que se presentan en ésta, por lo que el aceite de oliva se está convirtiendo en un producto de lujo cuya competencia con las otras grasas comestibles existentes en el mercado se hace cada día más difícil desde el punto de vista económico, incluso en los propios países productores.

La pregunta que cabe formularse es si la gran masa de consumidores que todavía hoy prefiere este aceite a los demás continuará siéndole fiel a pesar de las diferencias de precio existentes o si, por el contrario, asistiremos a un progresivo desplazamiento del aceite de oliva en los mercados por otros productos más económicos.

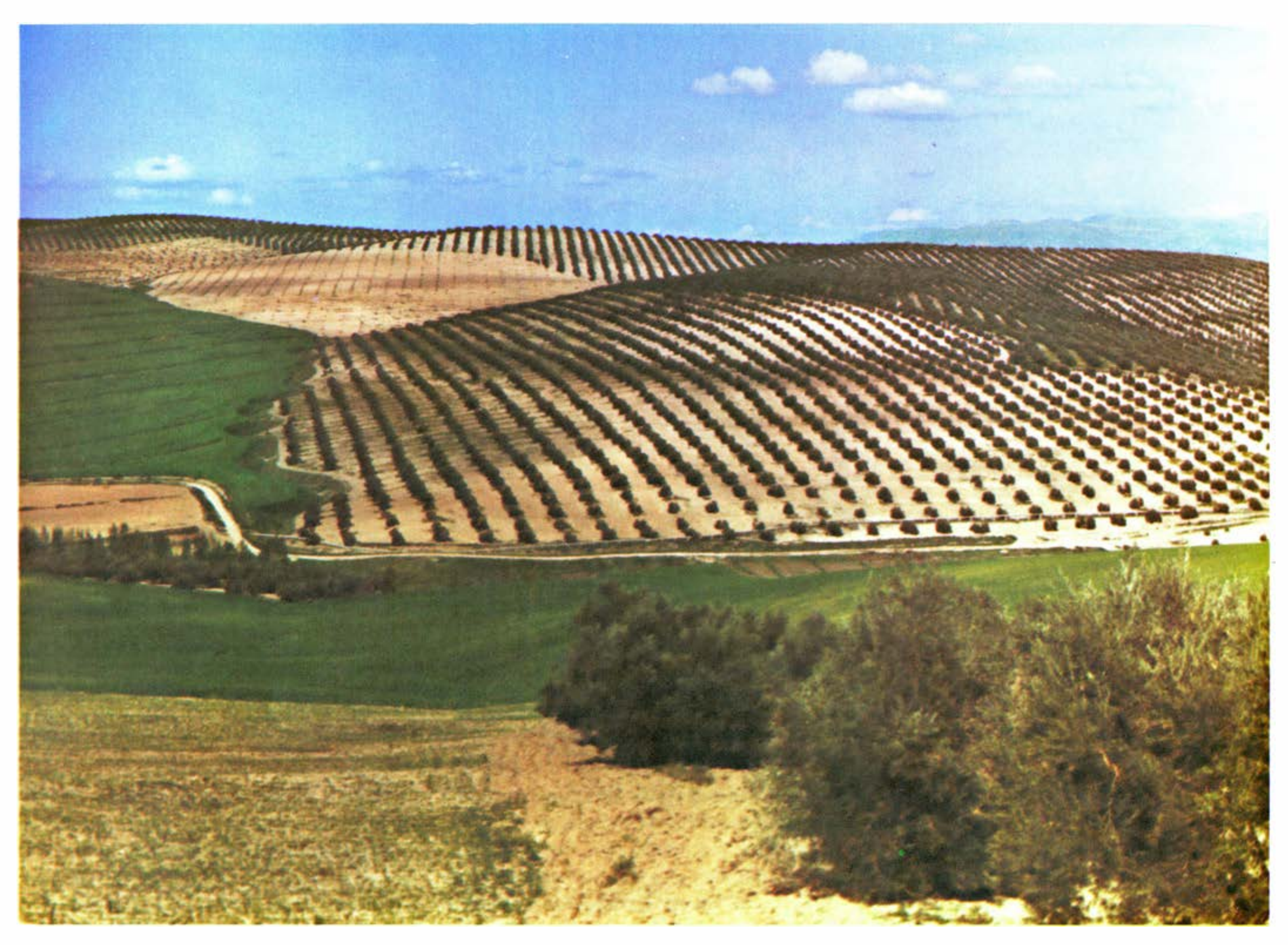
En nuestro intento de contestar a esta pregunta haremos primeramente una breve revisión del impacto que la moderna tecnología ha tenido en la producción y consumo de grasas comestibles y examinaremos a continuación las diferencias científicamente comprobadas entre el aceite de oliva y sus competidores que pueden racionalmente justificar las preferencias de sus actuales consumidores o incluso atraerle otros nuevos.

Hasta el último tercio del siglo XIX, las únicas grasas "visibles" utilizadas en la alimentación en los países occidentales eran, prácticamente, las de origen animal (tocino, mantecas y mantequilla) y el aceite de oliva, como representante casi único de los aceites vegetales. (Se llaman grasas "visibles" las utilizadas como tales en la alimentación, e, "invisibles", las que se ingieren formando parte de otros alimentos, animales o vegetales, como la carne, los huevos, la leche o las legumbres. En los adultos, según los diversos hábitos alimentarios, las grasas "invisibles" representan de un 30 a un 50 por ciento de los lípidos de la dieta.) La producción del aceite de oliva se consumía casi enteramente en los países de origen y, en los restantes, casi todas las grasas usadas en la alimentación eran sólidas y de origen animal. La mantequilla, como es sabido, aunque se presenta como un sólido es en realidad una emulsión que contiene hasta un 20 por ciento, como máximo, de la fase acuosa de la leche de que procede. Por otra parte, todas las grasas comestibles están formadas por proporciones variables de fases sólidas y líquidas, aunque aparezcan en forma sólida.

Desde el punto de vista de los hábitos alimentarios y de los usos culinarios, la presentación en forma sólida o líquida tiene mucha importancia: en los países del área del olivo se suelen preferir las grasas líquidas (aceite) mientras que en los demás se prefieren las grasas que llamaremos "sólidas". Estas preferencias derivan de costumbres adquiridas a lo largo de muchos siglos y han condicionado en gran medida la evolución de la tecnología en este sector.

En efecto, una de las primeras y más importantes aportaciones de la revolución industrial en el campo de la alimentación fue la invención de la "margarina" por el farmacéutico francés Mèges Mauriés, que tuvo lugar hacia 1870, durante la guerra franco-prusiana, tras un concurso convocado por Napoleón III para encontrar un sustituto de la mantequilla, que escaseaba. El nombre de "margarina" derivaba del "ácido margárico" que, según Chevreul, era uno de los constituyentes de las grasas animales, con 17 átomos de carbono, y que más tarde se averiguó que era en realidad un eutéctico, es decir, una mezcla de 50 por ciento de los ácidos palmítico y esteárico (respectivamente de 16 y 18 átomos de carbono), ya que los ácidos grasos con número impar de átomos de carbono son muy raros en la naturaleza. La margarina de Mèges Mauriés estaba integrada por sebos y otras grasas de menor punto de fusión a las que se emulsionaba una cierta proporción de suero de leche con sal y colorantes apropiados para darle el aspecto de mantequilla.

El impacto de la margarina en la industria de la alimentación fue tremendo. Su precio reducido, derivado de la posibilidad de utilizar una gran variedad de grasas de bajo costo para su fabricación y los fraudes a que daba lugar su venta como mantequilla, hicieron de ella el blanco predilecto de las legislaciones sanitarias de todos los países, lo que ha contribuido a desarrollar productos cada vez más perfectos y sofisticados que no se parecen en casi nada, si no es en el aspecto exterior, a los primitivos sucedáneos de la mantequilla. Las mejores margarinas de nues-

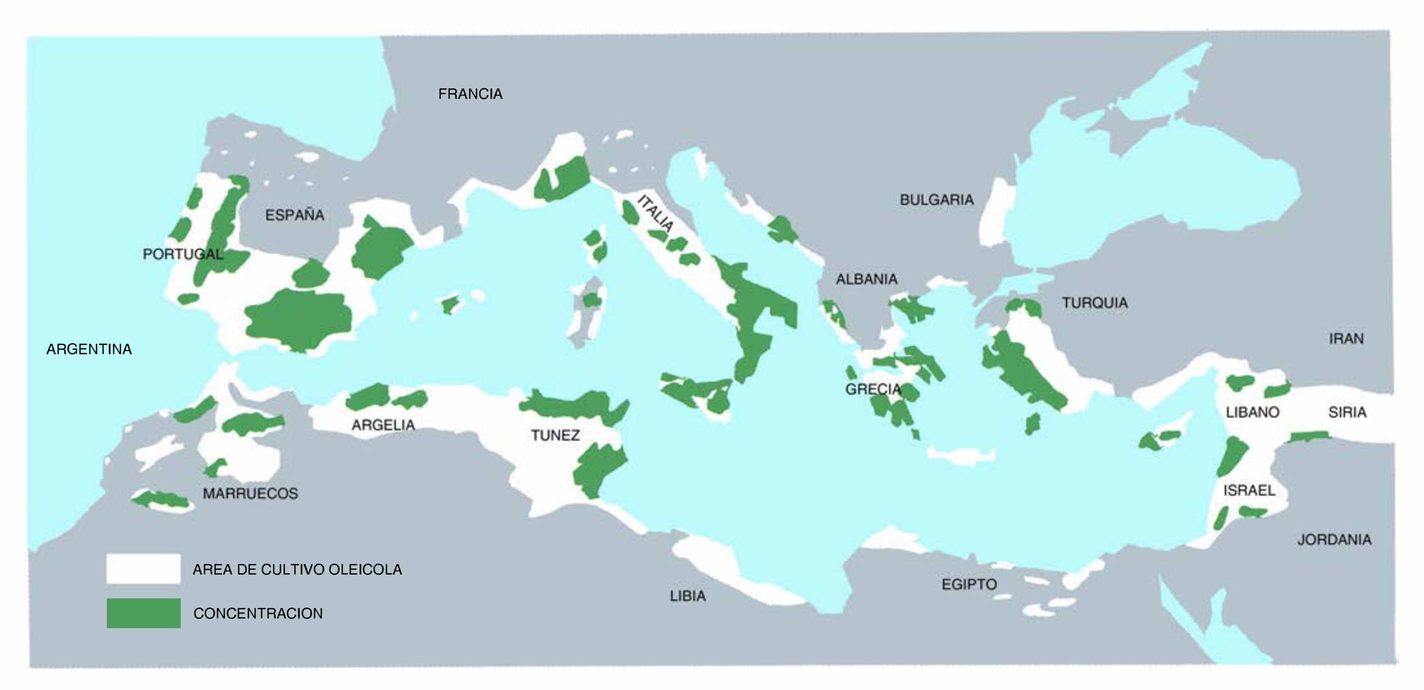


OLIVAR de la provincia de Jaén, la que mayor extensión de este cultivo posee en España. La producción media española de aceite de oliva se aproxima a los 400 millones de kilogramos anuales, con fuertes oscilaciones de una cosecha a otra, debidas a la alternancia o "vecería", que es característica del olivo. Además de la producción de aceite, es importante en España la de aceituna aderezada o "aceituna de mesa", en verde o en negro, con una producción media anual de 120 millones de kilogramos, que se exporta a todos los países en un 60 por ciento.

tros días, fabricadas en gran parte con aceites vegetales y de pescado parcialmente endurecidos, con adición de colorantes carotinoides, vitaminas y otros complementos dietéticos, tienen un lugar propio en la alimentación sin pretender sustituir a la mantequilla.

Para llegar a estos modernos productos fueron precisos otros descubrimientos y desarrollos tecnológicos, iniciados también a fines del siglo pasado y comienzos del actual. En primer lugar, la *extracción con disolventes* que hizo posible beneficiar íntegramente los aceites de numerosas semillas oleaginosas como el cacahuete, el sésamo, el girasol, el cártamo, la colza, la semilla del algodón o el haba de soja. Estos aceites se podían extraer parcialmente por prensado pero los residuos de la prensada, o "turtós", resultantes retenían todavía una proporción considerable del aceite inicial y se enranciaban con facilidad, dificultando su empleo como piensos.

Por otra parte, la mayoría de los aceites de semillas tal como resultan de la extracción no son directamente utilizables en la alimentación humana por contener productos de olor y sabor desagradables, colorantes oscuros, residuos de los disolventes utilizados, en su caso, o incluso micotoxinas y otras sustancias nocivas. Estas dificultades se vencen mediante la *refinación,* que consiste en la aplicación sucesiva de los tratamientos necesarios para privar al aceite de tales productos indeseables. Generalmente se empieza por un *desgomado* para separar los fosfátidos y sustancias mucilaginosas; sigue una *neutralización* con álcali de los ácidos grasos libres, separando por decantación o centrifugación los jabones que se forman; a continuación tiene lugar la *decoloración* del aceite neutro con tierras adsorbentes o con carbón activo que luego se separan en un filtro, y finalmente el aceite neutralizado y decolorado se somete a la *desodorización* que consiste en privarle de las sustancias volátiles mediante un arrastre con vapor de agua a temperaturas del orden de 200 grados Celsius y vacío de un 1 mm de mercurio. En algunos casos se emplea también la *desmargarinación,* que aumenta la fluidez de los aceites quitándoles las fracciones de más alto punto de fusión mediante enfriamiento y cristalización, seguidos de filtración o de centrifugación. Hay también procesos de *refinación física* en los que las sustancias volátiles y los ácidos grasos libres se separan conjuntamente por arrastre a vacío y temperatura alta sobre un aceite previamente decolorado y desgomado. Después de refinados, por unos u otros procedimientos, los aceites se presentan incoloros, inodoros e insípidos, libres de las sustancias que los inhabilitaban para la alimentación humana; pero al mismo tiempo pierden inevitablemente en todo o en parte, junto con las sustancias indeseables, otras interesantes como pueden ser algunos de los antioxidantes naturales que los protegen del enranciamiento (es sabido que los aceites refinados se enrancian más fácilmente que los crudos), ciertos colorantes de atractiva tonalidad, compuestos de actividad vitamínica y los aromas agradables. A pesar de estos inconvenientes, la refina-



DISTRIBUCION DEL CULTIVO del olivo en la cuenca mediterránea, según datos del Consejo Oleícola Internacional. Las áreas de cultivo están señaladas en color verde claro. Las de color verde oscuro son las de mayor intensidad de producción. En España, la superficie de olivar es de 2.200.000 Ha, frente a una superficie mundial de 5.500.000 Ha. Los principales países productores son España, Italia, Grecia, Turquía, Portugal, Túnez, Siria, Marruecos y Argelia, todos ellos con más de 10 millones de árboles. Con cifras menores están los siguientes países productores: Argentina, Francia, Jordania, Yugoslavia, Estados Unidos, Chipre, México, Israel, Japón, Chile y Egipto.

ción es indispensable para hacer comestibles a los aceites de semillas en prácticamente la totalidad de los casos, sobre todo si se han extraído con disolventes.

En fin, otro proceso cuya contribución a la tecnología de las grasas comestibles ha revestido la mayor importancia es la *hidrogenación* introducida por Norman en 1903; consiste en endurecer las grasas fluidas mediante la fijación de hidrógeno en los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados, que son líquidos a la temperatura ambiente, convirtiéndolos en ácidos saturados, que son sólidos. Así el ácido oleico se transforma en esteárico y un aceite líquido puede transformarse en una grasa sólida, apta para la fabricación de margarinas. El proceso tiene lugar haciendo pasar hidrógeno a través de la grasa a una presión de varias atmósferas y temperatura entre 140 y 200 grados Celsius en presencia de catalizadores de níquel o de níquel y cobre. Generalmente no se practica una hidrogenación completa, sino parcial y selectiva, para que la grasa obtenida no tenga un punto de fusión excesivamente alto que afecte a su digestibilidad. Las grasas que se someten a hidrogenación han de ser previamente refinadas para que no desactiven los catalizadores.

Los tres procesos descritos, *extracción con disolventes, refinación e hidrogenación* transformaron por completo el mercado mundial de las grasas comestibles, haciendo posible la utilización de materias primas vegetales de cosecha anual, como las semillas de cacahuete, girasol, colza, cártamo, maíz, soja, algodón, etc., que, después de extraerles el aceite, dejan como subproducto sumamente valioso (a veces más que el propio aceite extraído) harinas ricas en proteínas utilizables en los piensos compuestos a los que se restituye, si es preciso, una cierta proporción de grasa mediante la adición de sebos de bajo costo. También la refinación, seguida de hidrogenación, hizo posible el uso en la alimentación humana de muchos aceites de pescado cuyas características organolépticas los hacían incomestibles en crudo.

Todo ello determinó la aparición en el mercado de cantidades ingentes de grasas alimentarias, ya fuera en forma sólida –margarinas y grasas plásticas para pastelería, frituras y otros usos– o en forma líquida de aceites incoloros, inodoros e insípidos. La presentación comercial de las nuevas grasas podía hacerse en una u otra forma, a medida de las preferencias de cada mercado, e incluso su volumen total era regulable por proceder en la mayoría de los casos de plantas anuales, lo que, unido a la fuerte valoración de los subproductos, permitía alcanzar precios de costo sin posible competencia por parte de las materias grasas tradicionales, mantequilla, manteca de cerdo y aceite de oliva.

En menos de un siglo, las grasas comestibles han pasado de un pequeño número de materias naturales directamente utilizadas a una compleja gama de productos elaborados en cuya obtención interviene una tecnología muy avanzada, determinando la aparición de grandes industrias y un activo comercio internacional controlado en gran parte por gigantescas empresas multinacionales, que cuentan entre las de mayor capital del mundo. De su magnitud puede dar idea el hecho de que una de estas empresas posee laboratorios de investigación en tres países en los que trabajan más de quinientos graduados universitarios.

En contraste con lo anterior, el aceite de oliva continúa obteniéndose de acuerdo con los mismos principios básicos aplicados desde hace milenios y que ilustra un antiguo grabado *(véase la ilustración de la página opuesta).* Las aceitunas recolectadas se muelen y la pasta obtenida se exprime para separar la pulpa y huesos del aceite y del agua de vegetación de los frutos. No quiere decir esto que la elaboración del aceite de oliva no se haya modernizado; antes bien, es una de las ramas de la tecnología de alimentos que ha experimentado mayores progresos en los últimos años, a los cuales han contribuido principalmente Italia y España; pero los adelantos introducidos: lavadoras de aceitunas, molinos especiales, aparatos de percolación, prensas hidráulicas de carga y regulación semiautomáticas, centrífugas de diversos modelos, etc., no modifican los principios básicos de la extracción por medios exclu-

sivamente mecánicos, y su único objetivo es mejorar los rendimientos del proceso haciendo posible el tratamiento de grandes masas de aceitunas en poco tiempo, con perfecta higiene y con un reducido número de operarios. Las modernas instalaciones continuas de extracción a base de centrífugas reducen a un mínimo el espacio y la intervención humana, y aseguran la mayor limpieza; pero siempre sin menoscabo de la pureza del producto. Esta preocupación llega hasta el punto de que en la obtención de aceites de muy alta calidad se prefiere a veces acudir a técnicas que pueden parecer anticuadas, tales como utilizar molinos de piedra para que no incorporen al aceite trazas metálicas, o evitar su paso por las centrífugas donde, en contacto con aire, podría perder algo de su aroma propio.

Las normas de calidad vigentes para los aceites de oliva son muy exigentes en cuanto a la acidez libre, la posible oxidación (que se mide por absorción en el ultravioleta) y los caracteres organolépticos. Los aceites que cumplen estas especificaciones, que han sido obtenidos por medios exclusivamente mecánicos y que están libres de mezcla con cualquier otro producto se denominan *aceites vírgenes de oliva.* Los aceites de oliva defectuosos, llamados *lampantes* porque en tiempos se utilizaron para quemar en candiles y lámparas, se someten a refinación como los otros aceites vegetales, dejándolos incoloros, inodoros e insípidos, y se mezclan con aceites vírgenes de alta calidad para formar las llamadas mezclas Riviera, o aceites puros de oliva. La modernización en los procesos de extracción del aceite de oliva, el aumento de la capacidad de producción de las almazaras o molinos de aceite y las mejoras en el cultivo, la recogida y el transporte de los frutos tienden a reducir a un mínimo la producción de tales aceites "lampantes". En cuanto a los *aceites de orujo,* que se extraen con disolventes del residuo sólido de las aceitunas, su venta bajo la denominación de aceite de oliva está prohibida por convenio internacional entre todos los países productores.

A diferencia de lo que sucede con las semillas oleaginosas, las aceitunas no dejan un subproducto valioso después de extraerles el aceite. Además sus jugos acuosos (que no existen en el caso de las semillas) son un residuo cuyo vertimiento es altamente perjudicial para los cauces de agua porque presentan una alta demanda biológica de oxígeno y su elevado contenido en azúcares les hace fermentar fácilmente. Estos inconvenientes, unidos a las dificultades de tipo agronómico a que ya aludimos, a la escasa movilidad del cultivo y al obligado fraccionamiento de las explotaciones, determinan inexorablemente un costo de producción más alto para los aceites de oliva que para los de semillas.

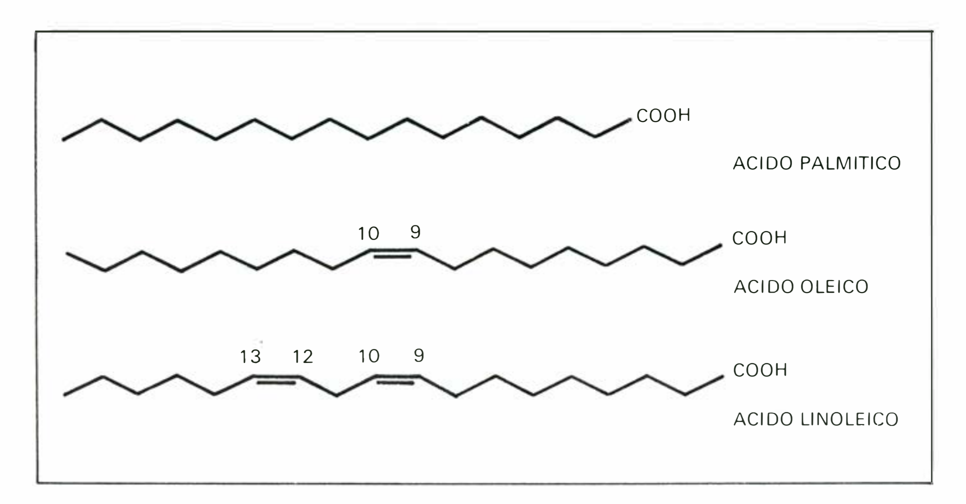
Ahora bien, ¿qué ventajas presenta, desde el punto de vista de la alimentación, el aceite de oliva que justifiquen su consumo a un precio más alto que el de los otros aceites vegetales?

Las que vamos a enumerar derivan, como es lógico, de su composición y sobre todo de que, *a diferencia de todos los otros aceites, el de oliva se consume crudo,* integral, tal como se encuentra en las aceitunas, sin que en su extracción intervenga ningún proceso químico ni productos extraños, como los disolventes y, por consiguiente, conservando los componentes del fruto solubles en él, algunos de los cuales poseen propiedades reconocidas e importantes desde el punto de vista de la fisiología y el metabolismo.

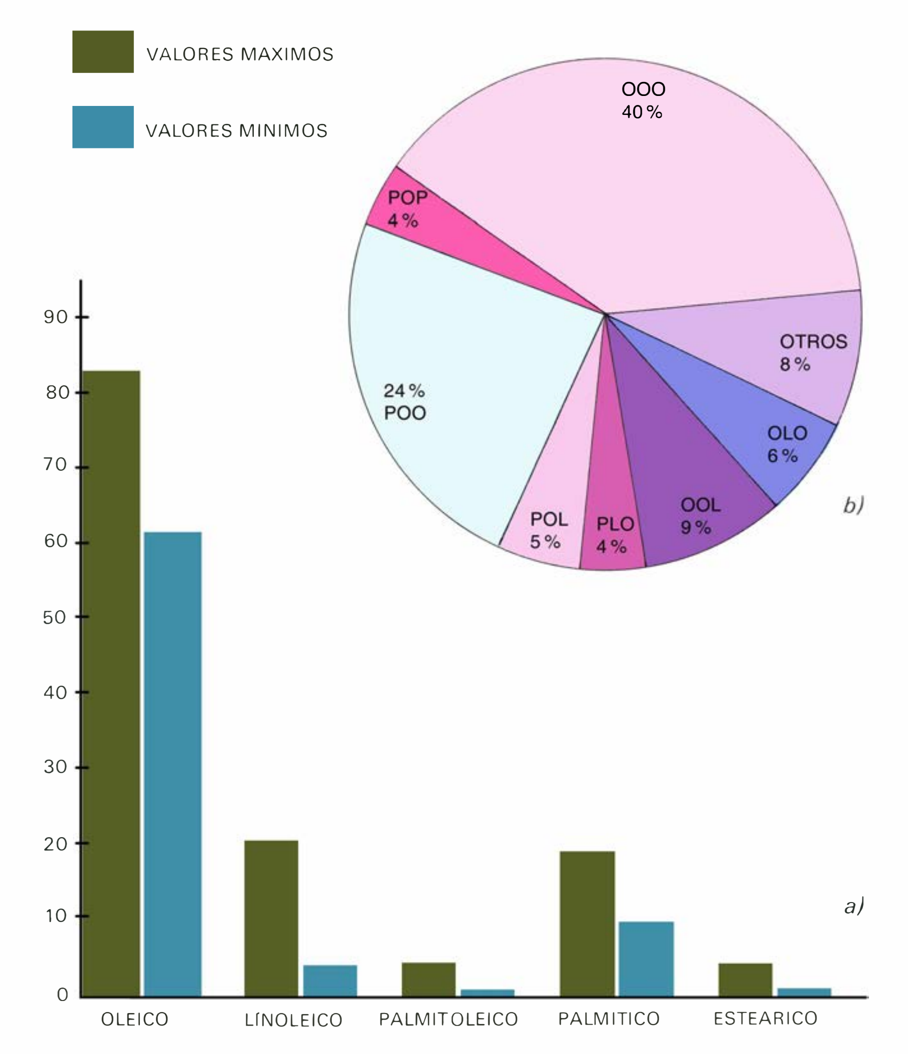
Los componentes fundamentales (llamados *componentes mayores*) del aceite de oliva que representan el 98 por ciento en peso del producto, son glicéridos, o sea ésteres mixtos de la glicerina con los ácidos oleico, linoleico, palmítico, palmitoleico y esteárico y con pequeñas proporciones de otros ácidos grasos, según se expresa en la ilustración de la página anterior donde aparecen los límites extremos encontrados en los porcentajes de cada ácido graso en muchos miles de muestras analizadas, procedentes de diversas regiones geográficas y variedades de aceitunas. Estos límites son muy amplios aunque se estrechan considerablemente para los aceites procedentes de una misma región o variedad. Hay que señalar, aunque no sea exclusiva del aceite de oliva, la elevada proporción de ácido oleico y la casi nula de ácido linolénico que es el característico de los aceites llamados *secantes,* como el de linaza, que se emplea en la fabricación de pinturas. El ácido linoleico (18 carbonos y dos dobles enlaces) de cuya importancia fisiológica nos ocupamos más adelante, se encuentra en un porcentaje promedio del 10 por ciento. La distribución de estos ácidos en las tres posiciones posibles de esterificación con la glicerina para formar los glicéridos mixtos se realiza según el modelo característico de los aceites vegetales, es decir: la posición intermedia (2) que corresponde al grupo alcohólico secundario de la glicerina



LA FABRICACION DEL ACEITE DE OLIVA en el siglo XVI, según un grabado de Jean Stradan (1523-1605). Al fondo, a la derecha, el molino de piedra donde se desmenuzan las aceitunas. Delante, un hombre llena los capachos con la pasta procedente del molino. Al fondo, a la izquierda, los capachos se prensan para exprimir el jugo oleoso, que se deja decantar en tinajas y se envasa en los pequeños toneles que lleva el burro en primer plano. La extracción del aceite de oliva no ha variado sustancialmente en sus principios, sino solamente en la aplicación de medios mecánicos más potentes y eficaces, como las prensas hidráulicas y las centrífugas. Hoy en día se construyen instalaciones de funcionamiento continuo basadas en separadores centrífugos de sólidos y líquidos, que ocupan reducido espacio y exigen poca mano de obra. Su aspecto es muy diferente al de las viejas prensas de tornillo, como la que se ve en la figura; pero lo esencial no ha variado, que es emplear exclusivamente métodos mecánicos y operar a temperatura ambiente, cuya finalidad última es que no se pierda en absoluto la calidad aromática del aceite de oliva.



LOS TRES ACIDOS GRASOS más abundantes en el aceite de oliva: ácido oleico, en el centro (18 átomos de carbono y un doble enlace en posición 9:10), ácido palmítico, *arriba* (16 átomos de carbono sin ningún doble enlace) y ácido linoleico, *abajo* (18 átomos de carbono con dos dobles enlaces aislados, en posiciones 9:10 y 11:12). De todos los ácidos grasos, el ácido oleico es el que más abunda en la naturaleza. El ácido linoleico es precursor de las prostaglandinas y su carencia puede conducir a ciertas afecciones cutáneas. El hombre no lo sintetiza en su organismo.



COMPONENTES MAYORES del aceite de oliva: *a)* ácidos grasos; la altura de las barras indica, para cada ácido graso, los porcentajes máximo y mínimo. No se incluyen los que se encuentran en muy pequeña proporción, como el linolénico o los saturados de más de 18 átomos de carbono; *b)* glicéridos; se dan los porcentajes medios según diversos autores. Las letras indican los ácidos grasos esterificados en cada glicérido y su posición relativa, así OOO = trioleína, POO = palmito-dioleína, OOL = dioleolinoleína, etcétera. En los aceites naturales de origen vegetal los ácidos grasos esterificados en la posición central de la glicerina son insaturados si la proporción de tales ácidos lo permite, es decir, si hay más de un tercio de ellos en la composición del aceite.

está siempre ocupada por un ácido insaturado mientras que el 66 por ciento restante de los ácidos grasos se distribuye al azar entre las otras dos posiciones *(véanse las ilustraciones de la izquierda)*.

Este hecho es importante porque permite distinguir mediante técnicas analíticas adecuadas los glicéridos naturales del aceite de oliva de los que se pueden obtener esterificando glicerina con una mezcla de ácidos grasos preparada con las mismas proporciones que la del aceite natural. Es importante también, desde el punto de vista fisiológico, porque la lipasa pancreática hidroliza los grupos éster primario de los triglicéridos y deja sin tocar el grupo éster secundario, produciendo en el intestino ácidos grasos libres y monoglicéridos en posición (2) (β-monoglicéridos) *(véase la ilustración superior de la página opuesta)*.

Resulta así que los glicéridos artificialmente preparados tienen un comportamiento fisiológico diferente del de los glicéridos naturales del aceite, lo que hace imposible producir aceites sintéticos cuyo metabolismo sea idéntico al del aceite natural. Este hecho, cuyas posibles consecuencias biológicas no han sido todavía estudiadas en el aceite de oliva, pero que se ha puesto de manifiesto por Rocquelin y colaboradores, del Laboratorio de Nutrición Humana del INRA de Francia en Dijon, en el aceite de colza, puede ser relevante para distinguir entre el valor nutritivo del aceite natural de oliva y de productos similares en cuya fabricación hayan intervenido procesos de esterificación o interesterificación.

La composición acídica óptima de las grasas comestibles en relación con la incidencia de la ateroesclerosis ha sido uno de los temas más discutidos en los últimos años. Los estudios epidemiológicos llevados a cabo en diversos países ponen de manifiesto un cierto paralelismo entre el consumo de grasas (sobre todo de grasas sólidas) y la frecuencia de los trastornos circulatorios debidos a la formación de ateromas. En los países de más alto nivel de vida se observa un aumento de la frecuencia de estas enfermedades superior al que sería de esperar por la prolongación de la vida media y por la desaparición de otras dolencias; ese aumento es paralelo con la elevación del colesterol sanguíneo, y esta elevación parece que puede corregirse o atenuarse sustituyendo las grasas saturadas de la dieta por grasas ricas en ácidos grasos poliinsaturados (ácidos linoleico y linolénico, principalmente). Entre los numerosos autores que han realizado in-

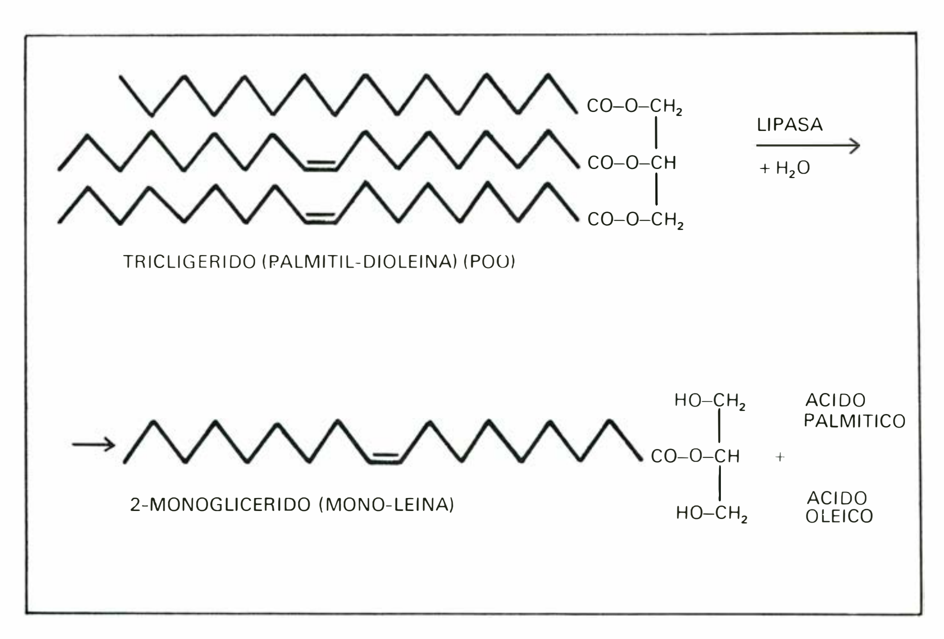
vestigaciones sobre este tema citaremos a Sinclair, de la Universidad de Oxford, y a nuestro compatriota el profesor Grande Covián.

Estudios muy recientes (INVESTIGACION Y CIENCIA, "El origen de la ateroesclerosis" por E. P. Benditt, abril 1977) parecen, sin embargo, demostrar que la iniciación de los ateromas se produce por una mutación en células de fibra lisa de la capa media de las arterias seguida de la proliferación de la célula mutante en la capa íntima arterial, por un mecanismo análogo al de los tumores benignos, siendo posterior el depósito de colesterol en el ateroma; lo que descarta una relación de causa a efecto entre el nivel de colesterol sanguíneo y la producción de los ateromas, aunque aquél pueda influir posteriormente en su crecimiento.

Una discusión detenida de este tema escapa de nuestras posibilidades, ya que no existe un acuerdo en las conclusiones de diversos autores, ni siquiera entre las de cuerpos médicos colegiados de diversos países, cuyos informes al respecto difieren sustancialmente. Nos bastará por tanto con decir que, desde el punto de vista de quienes mantienen que el grado de saturación de los lípidos de la dieta influye directa o indirectamente en la ateroesclerosis, los aceites muy ricos en ácidos poliinsaturados, principalmente en ácido linoleico serían preferibles en la dieta a las grasas saturadas, por su acción rebajadora del nivel de colesterol en sangre. El aceite de oliva ocuparía una posición intermedia, siendo preferible a este respecto a las grasas animales, pero inferior a ciertos aceites de semillas, como el de cártamo o el de maíz, que contienen mayor proporción de este ácido.

Por otra parte el ácido linoleico tiene otras funciones fisiológicas independientes de su posible influencia en el nivel sanguíneo de colesterol. Se le considera un ácido esencial porque el organismo humano no es capaz de sintetizarlo y es un precursor biológico del ácido araquidónico que interviene en la biosíntesis de las prostaglandinas, sustancias con múltiples funciones en el organismo y cuyas propiedades han sido objeto de gran número de trabajos de investigación en los últimos años.

El profesor Viola, de la Universidad de Roma, en un documentado trabajo sobre el aceite de oliva en la nutrición humana resume una amplísima bibliografía sobre la actividad biológica del ácido linoleico y llega a la conclusión de que, si un cierto nivel de este ácido es indispensable desde muchos puntos de vista, proporciones altas del mismo mantenidas durante largo tiempo pueden ser gravemente perjudiciales si no se acompañan de dosis suficientes de vitamina E. La relación entre ácido linoleico y la vitamina E en la dieta es, según numerosos autores citados por Viola, lo más importante para prevenir trastornos originados por una dieta lipídica mal equilibrada. Esta relación debe alcanzar un valor del orden de 0,6 mg de vitamina E/gramo de ácido linoleico. Por debajo de contenidos del 10 por ciento de ácido linoleico en la dieta, la dosis de ingesta de vitamina E no es relevante; pero a medida que aumenta la proporción de ácidos poliinsaturados ingeridos las necesidades de vitamina E se hacen mayores para mantener la debida relación. El



LA LIPASA PANCREATICA hidroliza los glicéridos en las posiciones extremas de la glicerina, dejando intacto el grupo éster central. Los productos de este desdoblamiento son, por cada glicérido, un monoglicérido en posición 2 y dos ácidos grasos. En el caso del aceite de oliva y en el de cualquier aceite vegetal que contenga más de un 33,3 por ciento de ácidos grasos insaturados, el 2-monoglicérido obtenido será, por consiguiente, insaturado. La presencia de ácidos saturados en los monoglicéridos que proceden de la hidrólisis con el enzima lipasa pancreática puede ser indicio de que el aceite ha sufrido, efectivamente, procesos de esterificación o interesterificación.

a) $CH_3C(CH_3)=CHCH_2CH_2C(CH_3)=CHCH_2CH_2C(CH_3)=CHCH_2CH_2CH=C(CH_3)CH_2CH_2CH=C(CH_3)CH_2CH_2CH=C(CH_3)CH_3$

ESCUALENO

b) α-TOCOFEROL

c) β-SITOSTEROL

COMPONENTES PRINCIPALES del insaponificable del aceite de oliva: *a)* escualeno, *b)* α-tocoferol y *c)* β-citosterol. El α-tocoferol es, de los cuatro tocoferoles comúnmente encontrados en productos naturales, el que posee mayor actividad como vitamina E. Los otros tocoferoles poseen menos actividad vitamínima y tienen en cambio mayor poder antioxidante. La relación entre actividad vitamínica E, expresada en miligramos de α-tocoferol, y ácidos poliinsaturados, en gramos debe ser del orden de 0,6 para una alimentación lipídica correcta.

aceite de oliva, con un porcentaje de ácido linoleico relativamente bajo y un contenido en α-tocoferol (vitamina E) que oscila entre los 50 y los 300 mg por kg de aceite, mantiene una composición adecuada desde este punto de vista; en cambio, aceites muy insaturados, aun conteniendo abundantes tocoferoles, se alejan excesivamente de la relación óptima citada.

Otro inconveniente importante de una alta insaturación en los aceites, principalmente si contienen ácido linolénico, es la facilidad con que se oxidan o enrancian, sobre todo cuando se emplean para frituras, pudiendo llegar a formar polímeros nocivos.

Los *componentes menores* (los que no son glicéridos ni ácidos grasos) del aceite de oliva son interesantes en la alimentación porque este aceite que, como venimos insistiendo, se come crudo los conserva íntegramente, mientras que los aceites de semillas los pierden en gran medida en la refinación que es indispensable para su consumo.

El grupo de componentes menores más estudiado hasta ahora es el llamado *residuo insaponificable* (por ser lo que queda después de saponificar los glicéridos y ácidos grasos) que representa aproximadamente un 1 por ciento del aceite total. Gracián y colaboradores, del Instituto de la Grasa de Sevilla, han estudiado esta fracción y revisado la bibliografía existente sobre la misma procedente de otros muchos autores, llegando a unos valores medios con grandes oscilaciones dependientes de la procedencia de los aceites. Casi la mitad del insaponificable del aceite de oliva es *escualeno,* un hidrocarburo ramificado e insaturado, ampliamente distribuido en la naturaleza *(véase la ilustración inferior de la página precedente).*

Los alcoholes grasos y los esteroles son también componentes importantes del insaponificable, sobre todo desde el punto de vista analítico porque sirven para distinguir la posible presencia de otras grasas, principalmente de las de origen animal, en mezcla con el aceite de oliva. Desde el punto de vista fisiológico el componente más interesante es el tocoferol por su actividad vitamínica. E. De los cuatro tocoferoles conocidos en la naturaleza (α, β, γ y δ) el único presente en el aceite de oliva según la mayoría de los autores es el α-tocoferol que es el que presenta la máxima actividad vitamínica. Los otros tocoferoles tienen una actividad más reducida, por lo que su concentración debe multiplicarse por un coeficiente menor que la unidad cuando se desea comparar esta actividad en aceites diversos. La disminución que experimentan los tocoferoles como consecuencia de la refinación no es grande y según algunos autores no llega al 10 por ciento del contenido inicial; pero este contenido inicial varía entre límites muy amplios, incluso para un mismo tipo de aceite (oliva, girasol, soja, etc.) según la procedencia y el tiempo de almacenamiento del aceite porque los tocoferoles, además de su actividad vitamínica, son antioxidantes naturales que protegen a la grasa del enranciamiento oxidándose ellos antes e impidiendo, por tanto, que el oxígeno llegue a reaccionar con los glicéridos y ácidos grasos. Desde el punto de vista de la actividad antioxidante, uno de los más activos es el γ-tocoferol, en el que son particularmente ricos algunos aceites de semillas. Sin embargo, a causa de la baja actividad vitamínica de este tocoferol, en los aceites de muy alta insaturación la relación a que antes hemos aludido entre vitamina E y ácidos poliinsaturados es menos favorable que en el de oliva.

En lo que se refiere a la actividad antioxidante, la fuerte resistencia frente al enrancimiento que se observa en el aceite de oliva no se debe a su contenido en α-tocoferol, sino a otro grupo de componentes, del que pasamos a ocuparnos.

Estos son los *polifenoles,* un grupo de componentes que hasta hace poco tiempo no habían sido estudiados ya que no son fáciles de detectar por las técnicas ordinarias de análisis de aceites, puesto que, por ser solubles en agua, se pierden generalmente en las aguas glicerinosas y no se encuentran ni en la fracción saponificable (ácidos grasos y glicéridos) ni en la insaponificable a que nos acabamos de referir. Vázquez Roncero y colaboradores, en el Instituto de la Grasa de Sevilla, y Montedoro, Ragazzi y otros investigadores italianos han estudiado en los últimos años esta fracción, separándola directamente del aceite por extracción con alcohol. El componente principal, y que se encuentra en todos los aceites, es el tirosol (p-hidroxifenil-etanol) acompañado de diversos polifenoles en proporciones muy variables de unos aceites a otros *(véase la ilustración de la izquierda).*

Algunos de estos polifenoles poseen (acción inhibidora frente a diversos microorganismos, pero su principal importancia reside, según los autores citados, en su actuación como antioxidantes naturales, que protegen al aceite contra el enranciamiento. Esta acción, de gran importancia para la estabilidad de los aceites de oliva vírgenes, se debe principalmente al hidroxi-tirosol o dihidroxifenil-etanol, compuesto presente en los aceites de oliva de buena calidad y que procede de la descomposición del glucósido amargo "oleuropeína", componente característico de las aceitunas. Estos polifenoles se oxidan rápidamente hasta desaparecer de forma que, según Vázquez Roncero, el contenido total de polifenoles del aceite de oliva es un indicativo de la estabilidad del aceite y de la "frescura" de los frutos utilizados.

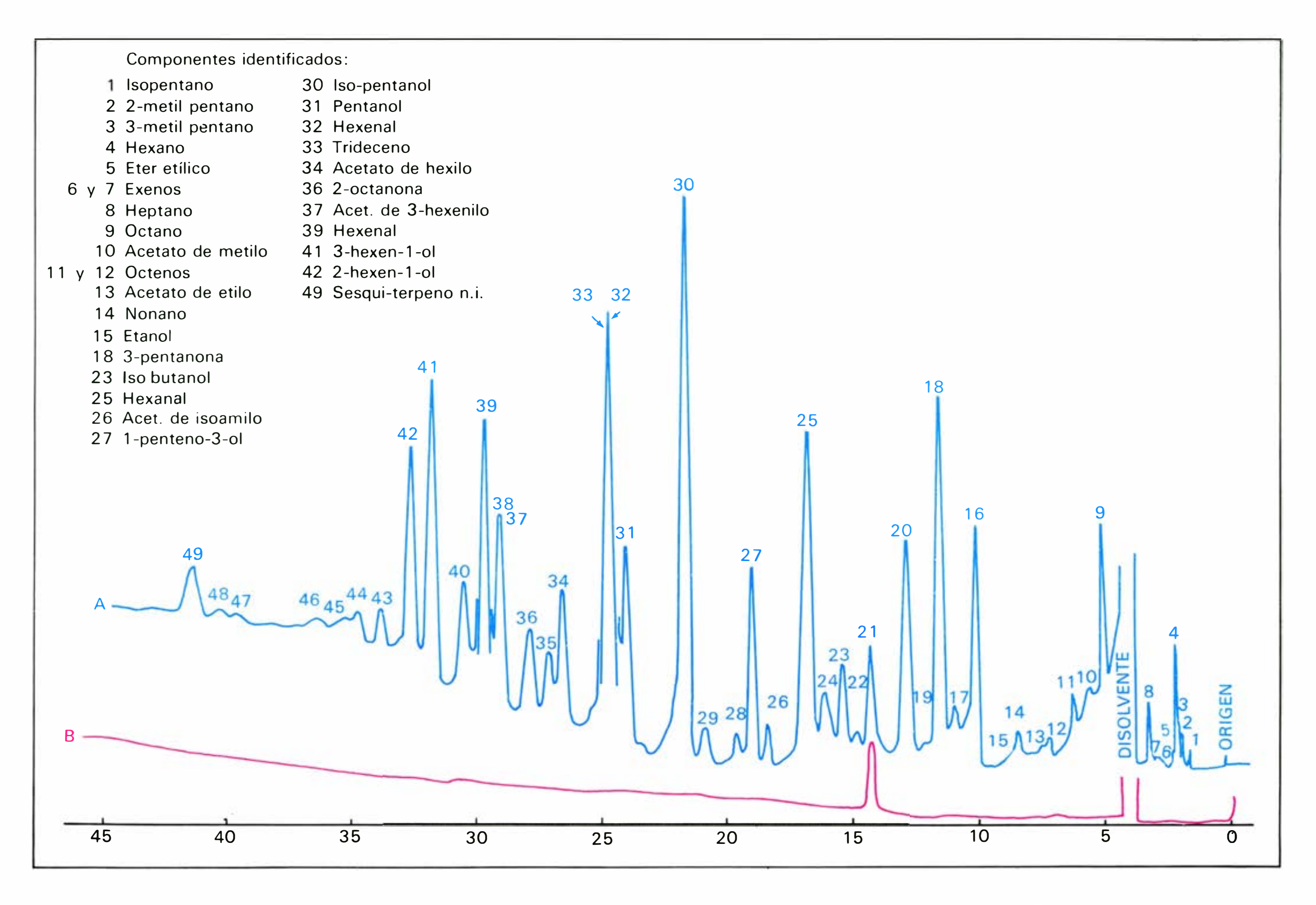
a) HO–C_6H_4–CH_2–CH_2OH

TIROSOL

b) (HO)$_2$–C_6H_3–CH_2–CH_2OH

3-HIDROXITIROSOL

EL ACEITE DE OLIVA VIRGEN contiene por término medio de 100 a 200 partes por millón de sustancias fenólicas procedentes de la pulpa de las aceitunas y que se disuelven en el aceite durante la molienda del fruto. Los fenoles más característicos y abundantes son el tirosol, es decir, 4-hidroxifenil-etanol *(a)* y el hidroxitirosol, es decir, 3,4-dihidroxifenil-etanol *(b)*, cuyas cantidades varían según el tipo de aceite y su estado de conservación. El hidroxitirosol es uno de los principales antioxidantes naturales del aceite de oliva virgen y lo protege del enranciamiento. Este polifenol procede de la hidrólisis de la oleuropeína, que es un glucósido de intenso sabor amargo, típico de la aceituna, cuya compleja molécula se rompe por acciones enzimáticas durante la extracción del aceite. Un aceite virgen con 200 o más partes por millón de polifenoles corresponde casi siempre a un aceite de buena calidad y muy estable frente al proceso de enranciamiento.



AROMAGRAMA de un aceite de oliva virgen y fresco, obtenido por cromatografía de gas líquido, acoplada con espectrografía de masas. Muchos de los componentes correspondientes a estos picos han podido ser identificados según la tabla inserta en la figura. Los componentes del aroma y sus proporciones varían mucho de unos aceites a otros, dando origen a las diversas cualidades aromáticas que se reconocen en el examen organoléptico hecho por catadores expertos. Cuando un aceite se somete a refinación desaparecen los picos hasta convertirse en una línea prácticamente recta. Si sufre enranciamiento aparecen nuevos picos correspondientes a los productos causantes de este tipo de alteración.

Entre los componentes menores figuran además, lógicamente, los *colorantes.* El color amarillo verdoso del aceite de oliva se debe en gran parte a residuos de clorofila y pigmentos carotinoides, pero también intervienen otros productos. Estos componentes han sido poco estudiados hasta ahora, sobre todo en lo que respecta a su actividad fisiológica.

El aroma característico del aceite de oliva se origina en un grupo de componentes que, por ser volátiles y encontrarse en proporciones mínimas, no ha podido ser estudiado hasta tiempos muy recientes. En los últimos años varios autores y principalmente Flath, del Agricultural Research Service de California, Fedeli, de la Stazione Sperimentale Oli e Grassi de Milán, y Gutiérrez González-Quijano y Olias, del Instituto de la Grasa de Sevilla, se han ocupado de este tema cuya importancia es grande porque la calidad aromática del aceite de oliva, que otros aceites no poseen como consecuencia de la refinación, es uno de los factores que más influyen en la preferencia de los consumidores.

Si una pequeña muestra de aceite de oliva se calienta a una temperatura moderada, inferior desde luego a los 100 grados Celsius, en un frasco con tapón de goma perforable, la mezcla del aire y vapores aromáticos que llena el frasco por encima de la capa líquida de aceite puede extraerse con una jeringuilla y analizarse en un cromatógrafo de gases. El resultado del análisis es lo que suele designarse un aromagrama de espacio de cabeza, formado por una serie de picos más o menos grandes, cada uno de los cuales corresponde, en principio, a un componente del aroma. Si el poder de resolución de la columna cromatográfica no es suficiente pueden unirse dos o más picos o aparecer más de un componente en un solo pico.

El número de componentes del aroma es muy elevado. Tanto su número como su distribución y proporciones varían además de unos aceites a otros, no sólo para diversas variedades de aceitunas, sino para diversas regiones de producción, tipos de suelos donde crecen los olivares, y condiciones climatológicas, variables como es lógico de un año a otro *(véase la ilustración de arriba).*

La aplicación de la espectrografía de masas en conjunción con la cromatografía de gases en columnas capilares de gran poder de resolución y aplicando diversas técnicas previas para obtener concentrados de los aromas sin desnaturalizarlos, ha permitido identificar hasta ahora unos 70 componentes que no siempre están presentes y que varían considerablemente en proporción de unos aceites a otros. No se ha conseguido hasta ahora, ni parece fácil, reconstituir una mezcla que, agregada a un aceite refinado, reproduzca fielmente el aroma característico de un buen aceite de oliva. Tampoco es éste el objetivo de estas investigaciones, que se dirigen más bien a conseguir, a través de los aromagramas, una evaluación objetiva de la calidad organoléptica de los aceites que hasta ahora tiene que determinarse por méto-

dos subjetivos, acudiendo al dictamen de catadores experimentados o por evaluación estadística de los dictámenes de grupos de expertos denominados *paneles.*

El estudio de los aromas y otros componentes no volátiles que influyen en el "flavor" (combinación de sensaciones gustativas, olfativas y tactiles) característico de los aceites de oliva permite entrever para un futuro, tal vez no lejano, la posibilidad, no sólo como hemos dicho de valuar objetivamente su calidad, sino también, dentro de ciertos límites, su *origen,* ya que es sabido que existen aceites muy característicos de determinadas regiones (como en España los de Alcañiz, Borjas Blancas, y otras regiones) que los catadores expertos saben reconocer y que alcanzan, por sus especiales excelencias, altas cotizaciones en los mercados.

Las investigaciones en curso o previsibles sobre el aceite de oliva no se agotan con las que hemos resumido en esta panorámica visión de las propiedades que lo hacen diferente de otros aceites y grasas comestibles. Falta mucho por conocer acerca de la significación fisiológica de sus múltiples componentes, mayores y menores. Recíprocamente, existen propiedades fisiológicas del aceite de oliva conocidas desde muy antiguo. como su acción colagoga (estimulante de la secreción biliar), superior a la de otros aceites, cuyo agente aún no ha sido encontrado entre los componentes, mayores o menores, conocidos del aceite,

Lo que hasta ahora se sabe, cuya breve sinopsis hemos procurado hacer, es suficiente para poder afirmar que el aceite de oliva presenta propiedades únicas que lo diferencian de los otros aceites, producto de la moderna tecnología de alimentos, y lo hacen superior a ellos al menos en las cualidades olfativas y gustativas, que son las que más influyen en el consumidor. Estas cualidades le confieren netas ventajas, sobre todo en las aplicaciones en que el aceite ha de consumirse crudo, como las ensaladas, o el típico "gazpacho" andaluz, y también en fritos a causa de la relativamente baja insaturación total que evita polimeraciones y otras transformaciones indeseables que sufren los aceites muy insaturados.

¿Serán todas estas cualidades suficientes para lograr la supervivencia del aceite de oliva en los mercados compitiendo con productos más económicos y sostenidos con el fuerte apoyo de grandes empresas internacionales; o acabarán, por el contrario los olivares por desaparecer del paisaje Mediterráneo?

La utilidad de la radiación de sincrotrón

Al moverse en una trayectoria circular a velocidad cercana a la de la luz, los electrones emiten una intensa radiación. Tal radiación constituye una fuente luminosa incomparable para el estudio de la materia

Ednor M. Rowe y John H. Weaver

Cuando Newton llevó a cabo su famoso experimento del prisma en 1666, todo el espectro conocido consistía en la estrecha banda de longitudes de onda de la luz visible. Hoy día el espectro electromagnético conocido es muchos órdenes de magnitud más ancho, extendiéndose desde las bajas frecuencias de las ondas de radio hasta los rayos gamma extremadamente energéticos. Además, el experimentador ya no depende, como dependía Newton, de las fuentes naturales de radiación. Casi todas las longitudes de onda pueden producirse a voluntad en el laboratorio. Para las longitudes de onda visibles y las zonas cercanas del infrarrojo y del ultravioleta se dispone de fuentes incandescentes, tales como las bombillas corrientes, tubos de descarga de gases y el láser. Las ondas de radiofrecuencia se generan con gran facilidad y flexibilidad mediante dispositivos electrónicos. Los rayos gamma se crean mediante las colisiones que se producen en los aceleradores de partículas y también se emiten en las desintegraciones radiactivas de algunos núcleos atómicos.

Queda una región del espectro electromagnético para la cual las fuentes clásicas de laboratorio no son adecuadas. Esta región se extiende desde las frecuencias inmediatamente superiores a las de la luz visible, pasando por las zonas del ultravioleta y de los rayos X, hasta las frecuencias de los rayos gamma de baja energía. Las longitudes de onda de esta amplia zona tienen las mismas dimensiones que las estructuras características de los átomos, moléculas y sólidos. De ello resulta que la interacción entre la radiación electromagnética y la materia es excepcionalmente fuerte. Si la radiación comprendida en esta zona fuese fácil de generar, serviría como una excelente sonda para estudiar la estructura de la materia.

Desde hace unos 10 años se ha empezado a disponer de una nueva fuente de radiación electromagnética que llena este intervalo casi idealmente. Es la radiación que emiten los electrones cuando se les obliga a seguir una trayectoria circular a una velocidad próxima a la velocidad de la luz. A este fenómeno se le conoce como radiación de sincrotrón, porque se observó por primera vez en las longitudes de onda visibles en los aceleradores de partículas de tipo sincrotrón. Hasta ahora, la mayoría de experimentos que emplean la radiación de sincrotrón se han efectuado con máquinas proyectadas principalmente para experimentar en física nuclear y en física de partículas elementales. Existen ya varias propuestas para construir máquinas dedicadas a la producción de radiación de sincrotrón; serían aceleradores de partículas usados como bombillas.

En la parte visible del espectro, la radiación electromagnética se genera principalmente mediante sólidos incandescentes y mediante electrones excitados de gases calientes. La luz emitida por los gases se compone de líneas brillantes discretas, cada una de las cuales posee una determinada longitud de onda que no puede modificarse fácilmente. Se emite luz cuando un electrón cae desde un estado excitado a otro estado de energía menor; la energía de la radiación emitida es igual a la diferencia de energía entre ambos estados. Como se sabe, la energía es inversamente proporcional a la longitud de onda: cuanto mayor sea la energía del fotón, o cuanto de luz, menor será la longitud de onda de la onda correspondiente. La energía se suele medir en electronvoltios; un electronvoltio se define como la energía adquirida por un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de un voltio.

La luz visible suele emitirse en virtud de las transiciones de los electrones de valencia (es decir los más exteriores), de los átomos. En estos electrones influye fuertemente su entorno inmediato; y sus niveles de energía quedan muy alterados cuando un gas rarificado se condensa para formar un sólido. En principio, los electrones de valencia tienen todavía niveles energéticos discretos, cuantificados, pero los niveles están difuminados en anchas bandas a causa de la proximidad de muchos átomos. En un sólido no se pueden distinguir niveles energéticos individuales o las estrechas líneas del espectro asociadas a las transiciones entre ellos. Por el contrario, el espectro emitido es un continuo: tiene unos picos (máximos) de intensidad a algunas longitudes de onda, pero también se irradia energía a todas las longitudes de onda vecinas. La distribución de longitudes de onda de un sólido ideal radiante posee una forma característica, denominada espectro del cuerpo negro.

Para el experimentador, un espectro continuo presenta ventajas evidentes. Las observaciones ya no quedan restringidas a las longitudes de onda que, por fortuna, corresponden a una línea de emisión disponible, sino que pueden hacerse a cualquier longitud de onda que se desee.

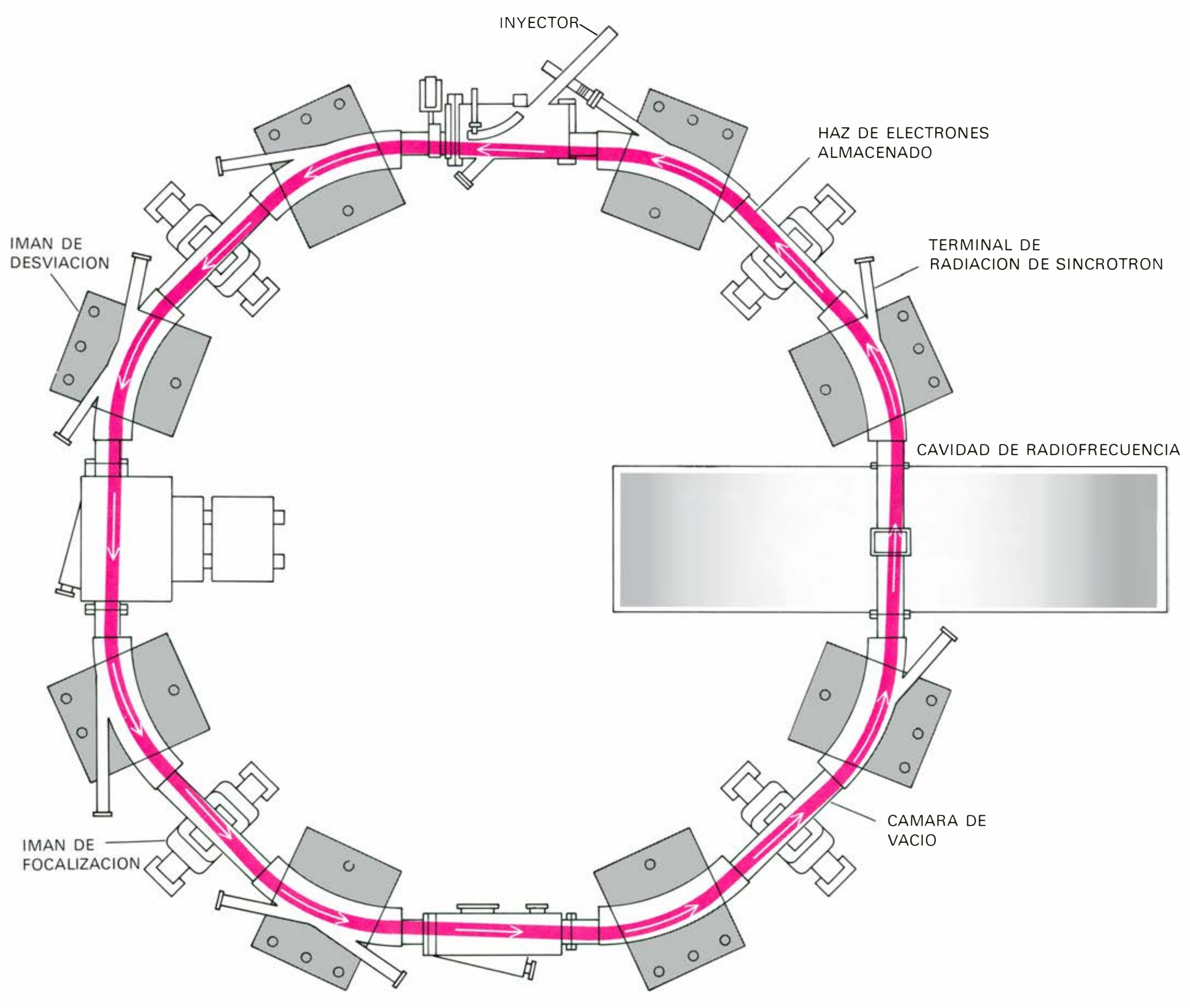
La longitud de onda del pico de emisión del espectro del cuerpo negro depende sobre todo de la temperatura. Al aumentar la temperatura, el pico se desplaza hacia longitudes de onda menores. A efectos prácticos, sin embargo, el pico de la intensidad no puede desplazarse a longitudes de onda mucho más cortas que las de la luz roja o amarilla, porque las temperaturas exigidas superarían los puntos de ebullición de todos los sólidos. Por ejemplo, el máximo de irradiación de una lámpara de filamento de volframio que esté funcionando a 3000 grados Kelvin se produce

a una longitud de onda de unos 9000 angstroms. El espectro visible se extiende desde los 4000 angstroms (violeta) hasta 7000 angstroms (rojo), aproximadamente, de manera que el valor de 9000 angstroms cae en la región infrarroja. El pico del espectro del cuerpo negro podría desplazarse hasta 3000 angstroms, en el ultravioleta cercano, calentando el filamento a 10.000 grados Kelvin. Sin embargo, el volframio metálico se funde a 3410 grados Kelvin, y hierve a 5927 grados Kelvin.

A causa de las limitaciones de temperatura del espectro del·cuerpo negro, las fuentes de radiación situadas en el ultravioleta han sido tradicionalmente lámparas de descarga de gases. La mayor parte de la radiación de estas fuentes se emite en las líneas del espectro discretas. Para las longitudes de onda de los rayos X, se puede volver a fuentes de estado sólido, pero estas fuentes también proporcionan principalmente emisión en líneas, con espectro continuo muy débil. Los rayos X no se generan excitando los electrones de valencia sino excitando los electrones de las capas internas. Estos electrones internos están fuertemente ligados y emiten líneas estrechas como si estuvieran aislados, al igual que ocurre con los electrones externos de los átomos de un gas.

En definitiva, la radiación electromagnética se debe a la aceleración de cargas eléctricas. Este es el significado de las ecuaciones de campo que describen el electromagnetismo y que fueron formuladas en el siglo XIX por James Clerk Maxwell. En casi todos los casos, las cargas aceleradas son electrones debido a que, entre las partículas cargadas, son con mucho las más livianas y, por tanto, las que se aceleran con mayor facilidad.

Ejemplo de una carga acelerada es un simple electrón que oscile en una línea recta con una velocidad que varíe sinusoidalmente, algo así como la plomada de un largo péndulo o un peso suspendido de un muelle. En cada ciclo completo, el electrón se acelera y desacelera dos veces y en consecuencia irradia una onda electromagnética que se propaga desde la partícula. La radiación tiene una frecuencia característica, igual a la frecuencia de oscilación del electrón.



EL ANILLO DE ALMACENAMIENTO DE ELECTRONES denominado Tantalus I funciona como una fuente de radiación de sincrotrón. La radiación se genera cuando unos electrones que se mueven a una velocidad cercana a la de la luz son obligados a seguir una trayectoria circular; en el Tantalus esto sucede en cada uno de los imanes de desviación, en donde las órbitas electrónicas describen arcos de circunferencia. Los electrones se introducen en el anillo de almacenamiento a través del inyector superior; una vez han sido acelerados a la energía de funcionamiento del anillo pueden almacenarse en una órbita prácticamente constante durante muchas horas. La pérdida de energía por radiación se devuelve a los electrones en la cavidad de radiofrecuencia. La radiación de sincrotrón se emite en un haz estrecho tangente a la órbita electrónica y las lumbreras para experimentos en que se emplea radiación son por tanto tangentes al anillo principal. (Ilustración de G. Kelvin.)

También pueden detectarse armónicos o múltiplos de esta frecuencia fundamental. La radiación configura un mapa espacial característico: es más intensa en el plano perpendicular al eje a lo largo del cual oscila el electrón, y disminuye hasta cero a lo largo de dicho eje. En un tubo Klystron, que es un generador de radiación de microondas, los electrones describen esos movimientos sinusoidales.

Las transiciones entre los estados energéticos de los electrones atómicos implican la aceleración de cargas, aunque no es corriente considerarlas desde este punto de vista. La aceleración puede imaginarse fácilmente en un modelo planetario, simplista, del átomo, pues el electrón que cambia de una órbita a otra debe cambiar su velocidad orbital. Tal modelo es un instrumento descriptivo útil; ahora bien, para un tratamiento cuantitativo de los espectros atómicos se necesita un modelo mecánico-cuántico más complejo. De hecho, la mecánica cuántica es necesaria incluso para explicar por qué las capas de electrones de los átomos son estables y los electrones no irradian toda su energía.

La conexión entre aceleración y radiación se hace evidente en el espectro emitido por algunos tubos de rayos X. Tales tubos operan acelerando electrones hasta impartirles una energía elevada, para luego dejarlos chocar contra un electrodo metálico. Dentro del electrodo, los movimientos de los electrones están influidos por los fuertes campos de los núcleos atómicos, que los frenan o incluso los detienen en un pequeño recorrido. En otras palabras, los electrones son desacelerados violentamente. La radiación resultante se conoce con la palabra alemana "bremsstrahlung", que quiere decir "radiación de frenado".

El espectro de la radiación de frenado es continuo dentro de su gama de longitudes de onda, pero sólo a energías mayores que unos 10.000 electrovoltios (o equivalentemente, a longitudes de onda menores que un angstrom) se puede obtener una intensidad significativa. Así, la radiación de frenado no proporciona una fuente continua en el ultravioleta ni en la zona de rayos X de menor energía. Además, los electrones que chocan contra un electrodo a energías tan altas suelen excitar a los electrones más internos de los átomos metálicos, que entonces vuelven al estado fundamental emitiendo un espectro de líneas de rayos X situado en la misma gama de longitudes de onda que la radiación de frenado. De ello resulta que la radiación aparece contaminada con líneas discretas más brillantes que el continuo.

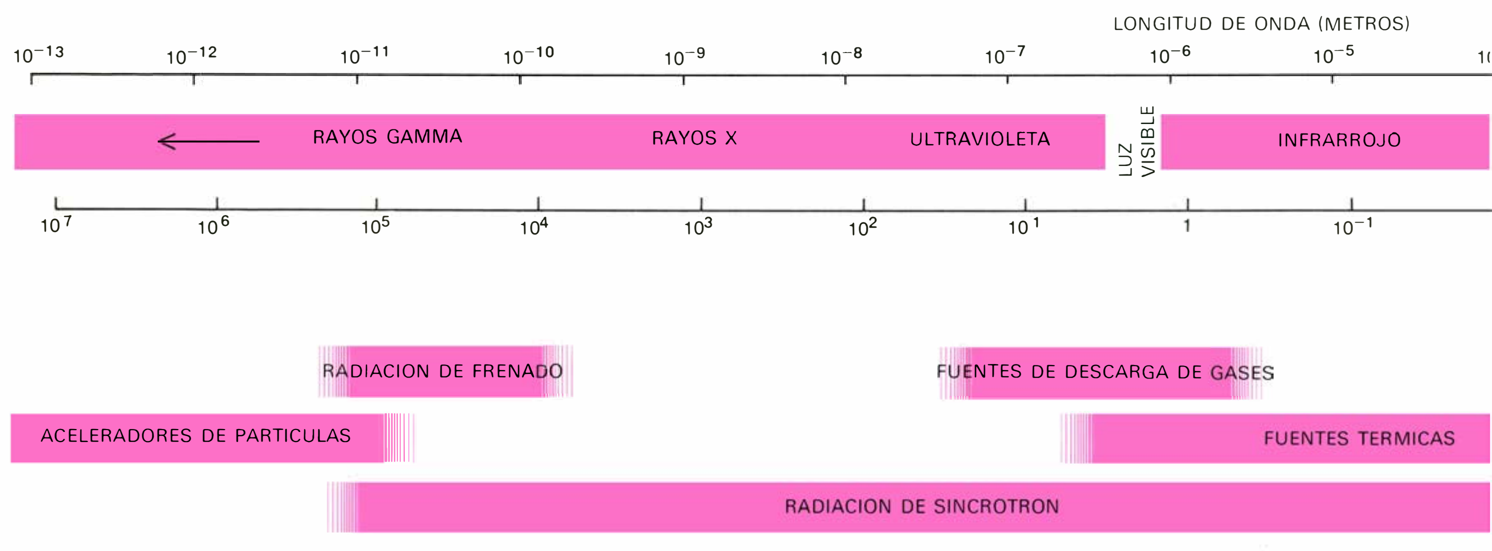
Un electrón que se mueve en una órbita circular con velocidad constante tiene un movimiento acelerado especialmente simple. Esta es la configuración de un electrón que emite radiación de sincrotrón. De hecho, esa radiación se detecta primeramente no en aceleradores de partículas sino en observaciones astronómicas. Los electrones que se mueven en los intensos campos magnéticos que hay en los restos de supernovas siguen trayectorias circulares (o helicoidales) y por tanto irradian por el mecanismo sincrotrónico. La generación de esa radiación en la tierra, en un acelerador circular de electrones, se investigó por primera vez en la década de 1940.

Debe subrayarse que una aceleración es cualquier cambio en la velocidad y que ésta no sólo define la rapidez sino también la dirección del movimiento. Por tanto una partícula que siga una órbita circular está sujeta constantemente a una aceleración centrípeta. Si las dimensiones de la órbita son estables y, constante, la velocidad orbital, la aceleración también será constante. El electrón irradia continuamente.

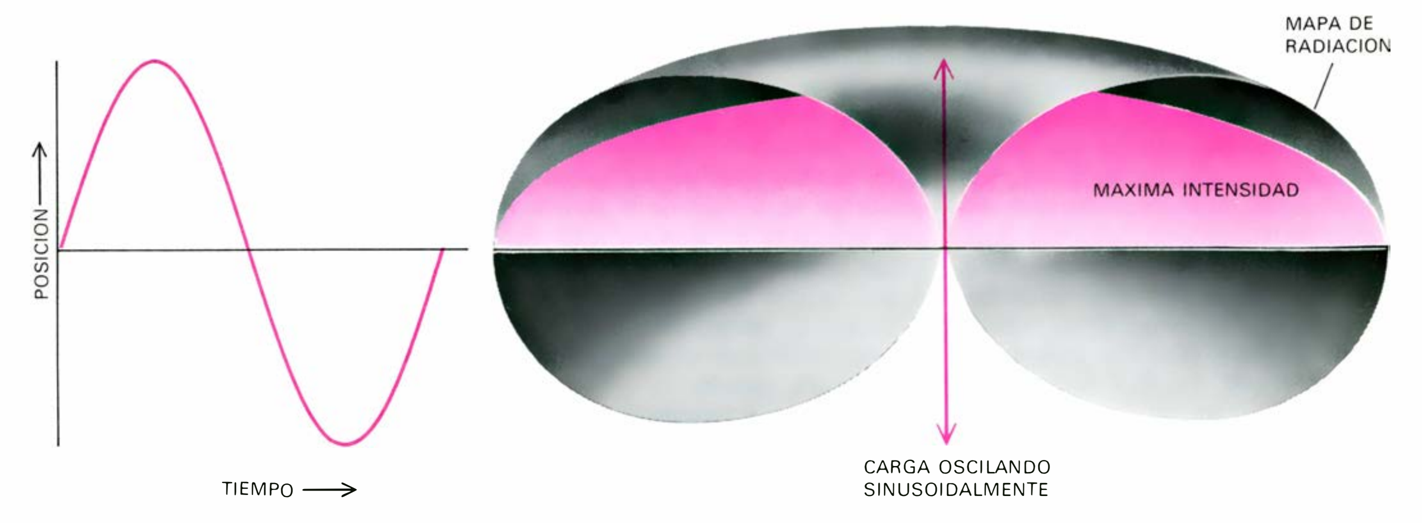
El matemático y físico británico Sir Joseph Larmor fue quien primero dedujo el mapa de la radiación de una carga que circule. Demostró que para un observador que se esté moviendo en el marco de referencia del electrón en órbita (y por tanto, que esté girando con él) la radiación es más intensa en el plano tangente a la órbita electrónica. La intensidad se anula en las direcciones paralelas a los radios de la órbita electrónica. Así pues, el mapa de la radiación tiene la forma de un anillo bastante grueso que gira alrededor de la órbita electrónica sobre un eje, correspondiente al radio de la órbita.

Para un observador que no se mueva con el electrón sino que lo vea desde el sistema de referencia del laboratorio, el mapa de la radiación cambia poco mientras la velocidad orbital sea modesta. A bajas velocidades del electrón, los efectos relativistas causan sólo una leve modificación, al disminuir la intensidad de la radiación en dirección hacia atrás y, al aumentar, hacia delante.

El mapa de Larmor se transforma mucho, sin embargo, cuando la velocidad del electrón circulante se aproxima a la de la luz. Para un observador situado en el sistema de referencia del laboratorio, la radiación hacia atrás y hacia los lados del electrón disminuye por completo, y toda la radiación se concen-



EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO describe la radiación según su longitud de onda o, en otra representación, según la energía de los fotones, los cuantos de radiación electromagnética. La longitud de onda y la energía del fotón están inversamente relacionadas. Ninguna fuente única de radiación abarca todo el espectro; la mayoría de las fuentes son eficaces sólo en una estrecha gama. Se dispone de radiación

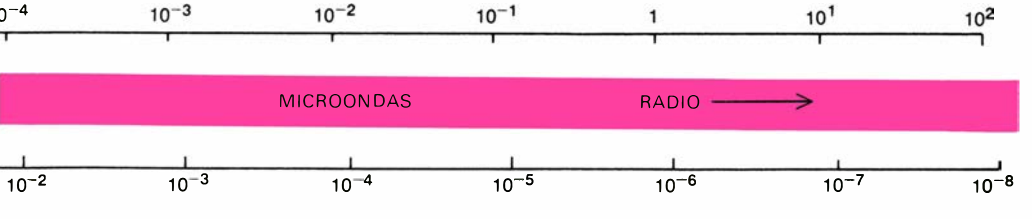


LA EMISION DE RADIACION es el resultado invariable de la aceleración de una carga eléctrica; la carga es casi siempre un electrón, la más liviana y más fácilmente acelerable de las partículas cargadas. Un ejemplo lo constituye un electrón dotado de movimiento oscilatorio sinusoidal a lo largo de una línea recta, como en el gráfico de la izquierda. La radiación emitida por tal electrón tiene una configuración característica, cuya intensidad máxima se observa en el plano perpendicular al eje de oscilación y es, efectivamente, nula a lo largo de dicho eje.

tra en un cono hacia adelante. A medida que la velocidad del electrón se acerca a la velocidad de la luz, este cono se estrecha cerradamente. El semiángulo (formado por el eje tangente a la órbita del electrón y el lado del cono) está dado con bastante aproximación por la expresión $\sqrt{1-v^2/c^2}$, donde v es la velocidad del electrón y c es la velocidad de la luz. Si v pudiese igualar a c, el ángulo de abertura del cono sería cero y toda la radiación se emitiría siguiendo la tangente. Los valores alcanzables del ángulo pueden ser bastante pequeños. Para electrones de una energía de 240 MeV (millones de electronvoltios), energía muy verosímil en un sincrotrón, v es 0,9999975 veces la velocidad de la luz. Sustituyendo este valor en la expresión anterior, encontramos que el cono de radiación diverge sólo por 0,1 grado, aproximadamente. De estos cálculos se deduce que un electrón que siga una órbita circular emite radiación tangencialmente, tal como una rueda de coche que gira expulsando el barro adherido. La radiación se emite en toda la circunferencia de la órbita, pero sólo dentro de un estrecho ángulo vertical centrado en el plano orbital. Para un observador que mire al haz de electrones desde este plano, la radiación es un punto brillante de aproximadamente la misma sección transversal que el haz de electrones, situado allí donde su línea de visión es tangente a la órbita y donde los electrones se están moviendo momentáneamente hacia él.

Así como el mapa espacial de la radiación de sincrotrón cambia cuando los electrones orbitantes se hacen relativistas, así también se altera la distribución espectral de la radiación. A bajas velocidades, el electrón irradia principalmente a su frecuencia orbital, tal como un electrón que oscila sinusoidalmente irradia a su frecuencia de oscilación. En una órbita de circunferencia fija, la frecuencia aumenta cuando el electrón se mueve más deprisa, pero a las energías electrónicas de interés, la frecuencia fundamental suele mantenerse constante. Lo que cambia significativamente cuando aumenta la energía es la distribución de la energía irradiada entre la frecuencia fundamental y los diversos armónicos de esta frecuencia. A baja velocidad, casi toda la energía se irradia a la frecuencia fundamental (la frecuencia de revolución). A medida que la velocidad del electrón se aproxima a c, va pasando más y más energía a los armónicos superiores. El orden de magnitud de la frecuencia armónica más elevada que irradia una energía significativa viene dado por $(1/\sqrt{1-v^2/c^2})^3$. Este parámetro se hace muy grande cuando v se aproxima a c. Para electrones con una energía de 240 MeV y una velocidad de 0,9999975 c, es aproximadamente 10^8. Un electrón relativista que esté girando en una órbita circular con una circunferencia de 10 metros tendría una frecuencia fundamental de revolución de unos 10^7 hertzios, radiación situada en la región de las ondas de radio. El 10^8-avo armónico de esta frecuencia es 10^{15} hertzios, que corresponde a una longitud de onda situada en el ultravioleta.

En sentido estricto, el espectro de la radiación de sincrotrón de un electrón aislado se compone de muchísimas frecuencias discretas: la serie de armónicos basada en la frecuencia fundamental de revolución. De hecho es un verdadero continuo. Los armónicos superiores de



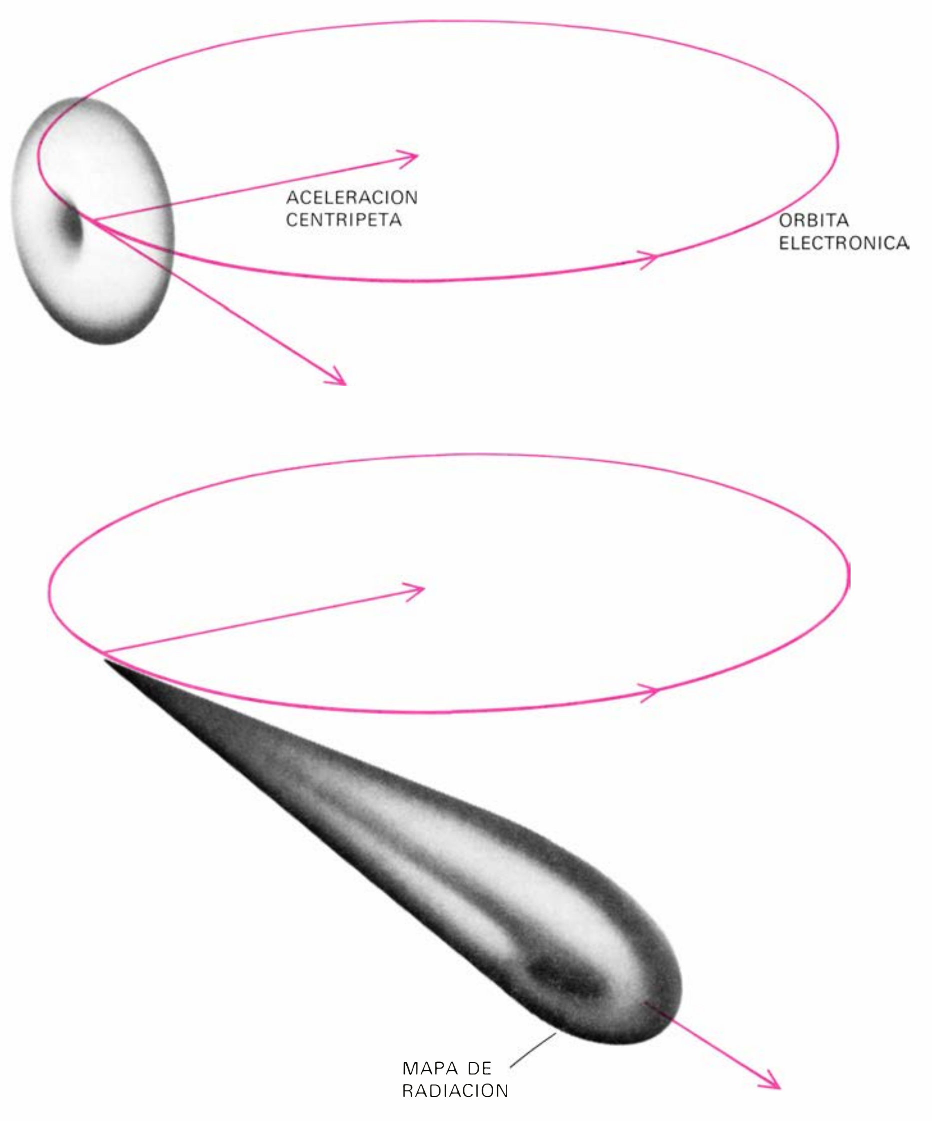
de sincrotrón de intensidad significativa desde las longitudes de ondas mayores que las de la luz visible, hasta el ultravioleta y las regiones de rayos X del espectro. En gran parte de esta gama se trata de la fuente de radiación que ofrece un espectro continuo, no longitudes de onda discretas.

cualquier frecuencia están muy juntos. Como ninguna línea espectral puede ser infinitamente estrecha y definida, las líneas aparecen todas mezcladas. A medida que la velocidad del electrón se aproxima a la velocidad de la luz, el espectro de sincrotrón se convierte en una banda ancha, continua, cuyo pico de intensidad se produce a una frecuencia muy superior a la frecuencia fundamental de rotación. El contenido de armónicos de la radiación se hace intenso primero en la región visible, después en la ultravioleta y, por fin, en la región de rayos X del espectro electromagnético.

Para un electrón que se mueve en una órbita circular, la energía total perdida como radiación de sincrotrón es proporcional a la expresión $(1/\sqrt{1-v^2/c^2})^4$, lo que implica que las pérdidas por radiación aumentan en proporción a la cuarta potencia de la energía del electrón. Un aumento de la energía de los electrones por un factor 10 aumenta la energía irradiada en unas 10.000 veces. La pérdida constituye un inconveniente para el físico interesado en mantener a los electrones en un acelerador de partículas de forma circular. Sin embargo, esta pérdida representa también una fuente incomparable de radiación de alta intensidad y de frecuencia ajustable.

Dos clases de máquinas constituyen fuentes adecuadas de radiación de sincrotrón: los sincrotrones de electrones y los anillos de almacenamiento de electrones. Ambos dispositivos constan de una cámara de vacío toroidal rodeada de varios imanes de desviación y de enfoque y comprenden cavidades para la inyección de energía de radiofrecuencia. La órbita circular del electrón se mantiene mediante los imanes: en cualquier punto, el radio de curvatura de la órbita es inversamente proporcional a la intensidad del campo magnético.

En el sincrotón, se inyecta un "paquete" o pulso de electrones en la cámara de vacío y luego se acelera a lo largo de muchas revoluciones hasta una energía máxima. La aceleración se efectúa mediante energía de radiofrecuencia proporcionada a través de una cavidad resonante o a través de varias cavidades que forman parte de la cámara de vacío. A medida que aumenta la velocidad de los electrones, debe aumentarse asimismo, lentamente, el campo magnético, en sincronía con la aceleración; de ahí el nombre de sincrotón. Por último, cuando los electrones han alcanzado su energía final, se les extrae de la máquina.



UN ELECTRON EN ORBITA CIRCULAR tiene una aceleración centrípeta continua y por tanto irradia continuamente. A una velocidad orbital relativamente pequeña (bastante menor que la velocidad de la luz) el mapa de la radiación parece un toro centrado en el electrón y cuyo plano de máxima intensidad es tangente a la órbita del electrón *(arriba)*. A medida que la velocidad orbital aumenta, el mapa de la radiación se distorsiona progresivamente. Cuando la velocidad del electrón se aproxima a la velocidad de la luz, toda la radiación queda confinada en un estrecho cono tangente a la órbita *(abajo)*. La frecuencia de la radiación cambia a la vez que se forma. A baja velocidad es igual a la frecuencia de rotación; a velocidad relativista la energía radiante se distribuye entre muchos armónicos superiores de la frecuencia de rotación y el espectro resulta prácticamente continuo.

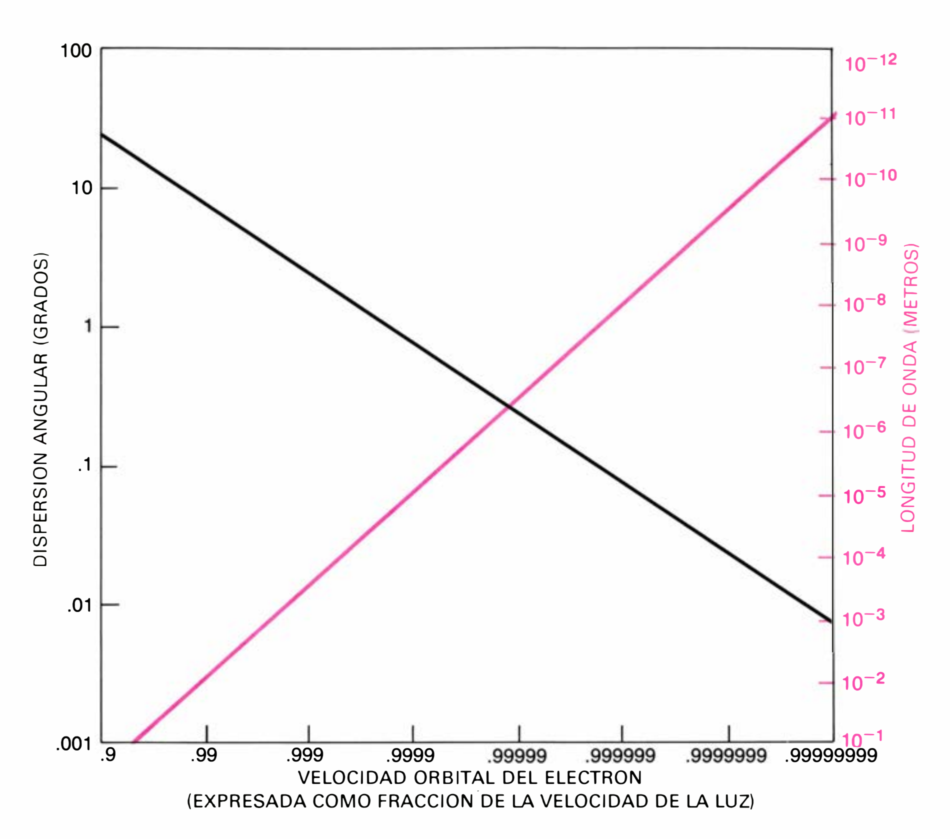
Un anillo de almacenamiento de electrones es parecido, tanto en su construcción como en su funcionamiento. Los electrones se inyectan en la cámara de vacío de forma toroidal y se confinan en una órbita circular mediante imanes de desviación. La principal diferencia es que los electrones no se extraen después del ciclo de aceleración; por el contrario, se les hace circular a una energía constante, a menudo durante muchas horas. También se precisa una fuente de energía en forma de cavidad de radiofrecuencia, pero sólo para compensar la energía perdida por radiación de sincrotrón. Algunos anillos de almacenamiento reciben electrones de alta energía desde un acelerador externo. En otros los electrones se inyectan a baja energía y el anillo se hace funcionar brevemente como sincrotrón para acelerarlos. En cualquier caso, una vez establecido el haz, los electrones pueden ocupar una órbita estable casi indefinidamente. Su velocidad se mantiene a través de pequeños incrementos de energía electromagnética, proporcionada en cada revolución. La órbita se define por los imanes de desviación, y la dispersión del haz se evita mediante imanes de focalización. Los electrones recorren el anillo en "paquetes" de unos pocos centímetros de longitud; el anillo puede funcionar con un solo paquete de electrones o con varios. A los efectos de generar la radiación de sincrotón, los anillos de almacenamiento ofrecen ciertas ventajas sobre los sincrotones. En el sincrotón, el espectro de la radiación cambia en cada revolución a medida que el paquete de

electrones adquiere energía. La posición del paquete dentro del tuvo del haz –y por tanto la posición del punto radiante– puede variar durante el ciclo de aceleración. En un anillo de almacenamiento, en cambio, tanto el espectro como la posición del haz permanecen constantes (aunque pueden regularse si es necesario). En el caso de un anillo de almacenamiento, la distribución espectral y la intensidad de la radiación de sincrotrón pueden calcularse directamente si se conocen tres factores; a saber: el número de electrones almacenados, su energía y el radio de curvatura de la órbita. El haz en un anillo de almacenamiento es bastante estable y sus características están lo suficientemente bien entendidas como para poder usar la radiación de sincrotrón como un patrón para calibrar otras fuentes de radiación y detectores de la misma.

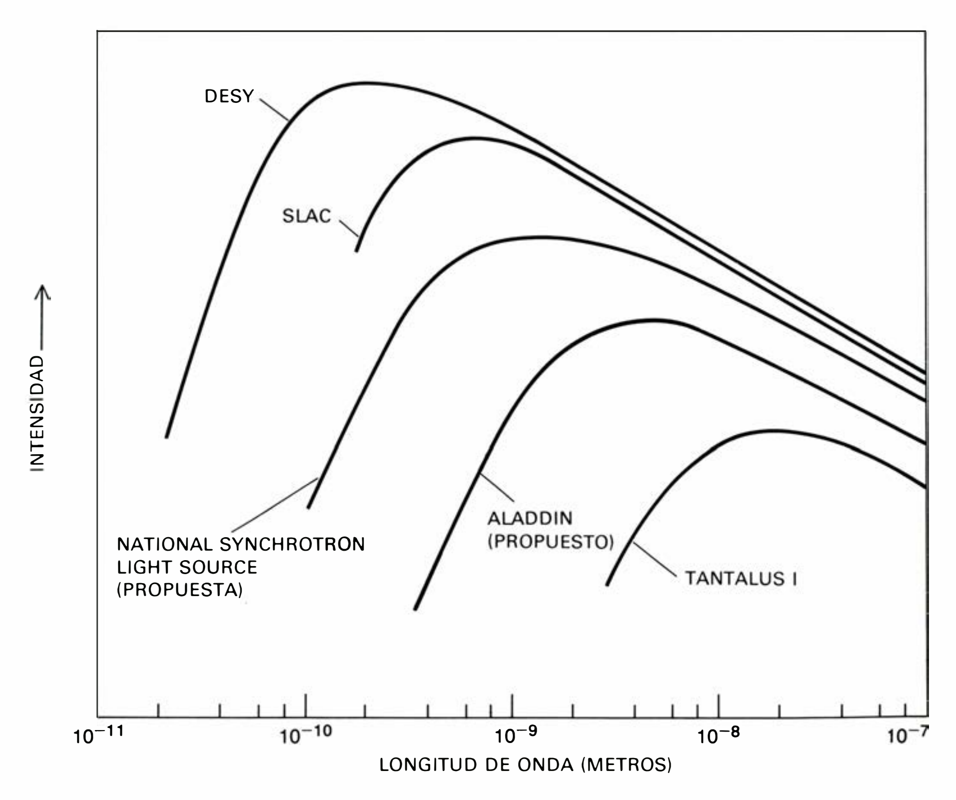
Tanto si se genera mediante un sincrotrón como mediante un anillo de almacenamiento, la radiación de sincrotón tiene varias propiedades que la hacen particularmente conveniente como fuente de iluminación. La ventaja principal es, desde luego, la elevada intensidad de la radiación emitida en un amplio intervalo de longitudes de onda. Se dispone de un flujo útil desde el infrarrojo cercano hasta los rayos X "duros": aquellos cuya longitud de onda mide menos de un angstrom aproximadamente.

En muchos experimentos en que se usa como sonda la radiación electromagnética, conviene polarizar la radiación de manera que todas las ondas del haz orienten sus campos eléctricos en la misma dirección. La polarización uniforme elimina la ambigüedad en la interpretación de algunas mediciones y permite una mayor variedad de éstas. La radiación de sincrotrón está polarizada por naturaleza, siendo el campo eléctrico paralelo al plano de la órbita electrónica. El grado de polarización varía con la longitud de onda y es una función del ángulo por encima o por debajo del plano orbital. A la longitud de onda del máximo de intensidad, y en el plano orbital, la radiación se polariza al 100 por ciento.

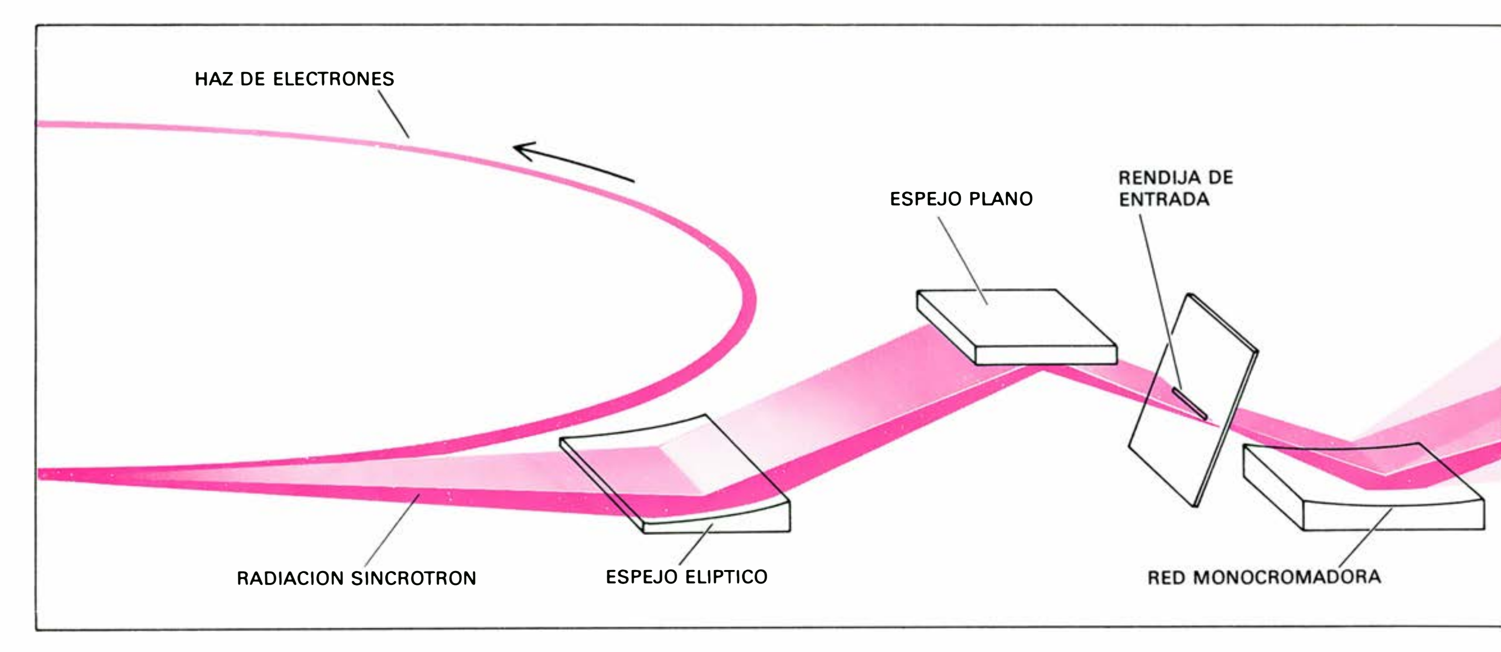
El hecho de que en un anillo de almacenamiento los electrones circulen no como una corriente continua sino en pequeños paquetes, influye también en la radiación de sincrotrón, de tal manera que a menudo constituye una ventaja para el experimentador. Cuando se mira desde cualquier punto fijo situado sobre el perímetro del anillo, la radiación de sincrotrón no es continua sino que aparece como una serie de pulsos breves.



LA LONGITUD DE ONDA Y LA DISTRIBUCION ANGULAR de la radiación de sincrotrón cambian rápidamente cuando la energía de los electrones emisores aumenta y su velocidad se aproxima a la velocidad de la luz. Aquí la velocidad se expresa en escala logarítmica como fracción de la velocidad de la luz. Las longitudes de onda indicadas son las longitudes de onda más cortas para las que se irradia una potencia significativa para determinada energía del electrón. La distribución angular de la radiación se hace más estrecha conforme aumenta la energía, y finalmente la radiación se convierte en un pincel colimado de rayos que aparecen casi paralelos.



LAS FUENTES de radiación de sincrotrón proporcionan un espectro continuo con un máximo de intensidad a una longitud de onda ue está determinada por la energía de los electrones acelerados y el radio de curvatura de la órbita electrónica. Las mayores energías electrónicas y las longitudes de onda más cortas se han obtenido en el sincrotrón electrónico de Hamburgo (DESY) y en el Stanford Linear Accelerator Center (SLAC). El Tantalus I, en el cual la máxima luminosidad se produce en la parte ultravioleta del espectro, funciona para la producción de radiación de sincrotrón.



UN HAZ EXTRAIDO de radiación de sincrotrón se emplea habitualmente en formas de espectroscopia, en las que se mide la interacción de la radiación con la materia en función de la longitud de onda. La radiación de sincrotrón está por naturaleza bien colimada, pero mediante un espejo elíptico o parabólico se convierte en un haz convergente. El espejo debe disponerse de manera que la radiación le llegue en incidencia rasante; de lo contrario, una parte considerable de los rayos de lontitud de onda corta serían absorbidos y no reflejados. El haz entra luego en un monocromador, en donde una red de difracción lo dispersa en un espectro, tal como un prisma dispersa la luz visible. Para las longitudes de onda ultravioleta, la red del monocromador suele ser una placa de cristal rayada; para las longitudes de onda de los rayos X, las

Cada vez que pasa el paquete de electrones, se emite un destello de radiación: cuando el paquete está en cualquier otro punto de su órbita, no se observa radiación. En muchos experimentos esta pulsación es ventajosa. En particular pueden estudiarse los estados excitados de los átomos que se desintegran (decaen) en el corto período de oscuridad.

El fácil acceso a un vacío excelente constituye otra ventaja incidental que ofrece el caso de un anillo de almacenamiento de electrones como fuente luminosa. Para que un anillo de almacenamiento de electrones funcione satisfactoriamente se requiere un vacío elevadísimo, de 10^{-10} o 10^{-11} tor; cualquier resto de gas presente en el anillo dispersaría los electrones almacenados y por tanto reduciría el período durante el cual el haz puede almacenarse. Los conductos que llevan la radiación de sincrotrón a las estaciones experimentales comunican con el anillo; por tanto, deben mantenerse al mismo vacío. Como para muchas de las observaciones que pueden hacerse con la radiación de sincrotrón se precisa un elevado vacío, la muestra que debe iluminarse suele colocarse en una cámara experimental que comunica con el sistema de vacío del anillo de almacenamiento.

Hace sólo 30 años que se conoce la radiación de sincrotrón y sólo en los 10 últimos años se ha usado extensamente en investigación. Rober P. Madden y Keith Codling, del National Bureau of Standards de Estados Unidos, la emplearon por primera vez con éxito en 1963. Con la radiación de un sincrotrón de electrones de 180 MeV pudieron efectuar mediciones sin precedentes de la absorción de rayos X de baja energía por gases.

Desde entonces, se han obtenido fuentes más intensas de radiación de sincrotrón. Una de las primeras se logró en el sincrotrón electrónico de Hamburgo, designado en forma abreviada por DESY. El anillo de almacenamiento del DESY. se usa en primer lugar para investigación en partículas elementales de alta energía y se obtiene radiación de sincrotrón como un producto secundario "libre".

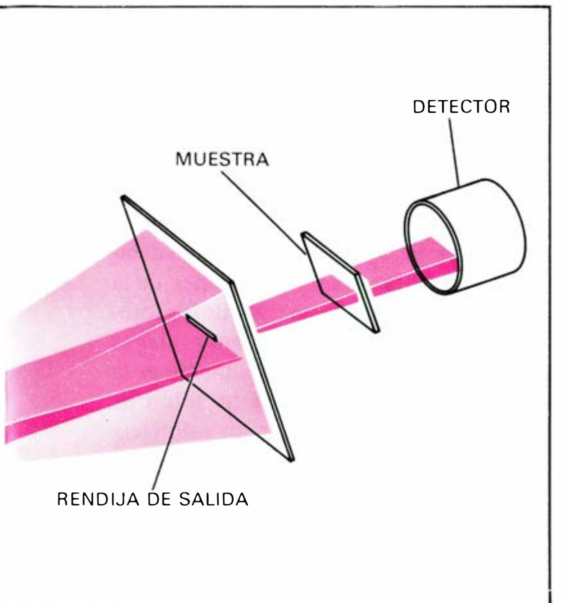
Un dispositivo similar existe en el Stanford Linear Accelerator Center, en donde la radiación de sincrotrón se genera en el anillo de almacenamiento denominado SPEAR. Los anillos del DESY y del SPEAR almacenan de hecho haces de electrones y de sus antipartículas (positrones) girando en sentido contrario, pero sólo se usa la radiación del haz de electrones.

Hasta hace poco sólo un acelerador había sido dedicado exclusivamente a la obtención de radiación de sincrotrón. Se trata del Tantalus I, que funciona en la Universidad de Wisconsin para la National Science Foundation. El Tantalus I se diseñó para investigaciones en tecnología de aceleradores de partículas, pero en 1966 se propuso que la máquina podía ser más útil como fuente de radiación para el estudio espectroscópico de sólidos y gases. La propuesta fue aceptada y el primer haz de radiación de sincrotrón se obtuvo en 1968.

El Tantalus I es un anillo de almacenamiento de electrones que funciona a una energía de 240 MeV. Los electrones se inyectan en el anillo mediante un pequeño acelerador, llamado microtrón, que les da una energía inicial de 40 MeV. Luego, el anillo de almacenamiento funciona brevemente como sincrotrón hasta que los electrones alcanzan su energía final.

El Tantalus I tiene nueve terminales en los que se recoge la radiación de sincrotrón y varios de estos haces de radiación se desdoblan de manera que puedan servir simultáneamente para más de un experimento. Cada año puede darse cabida a unos 40 grupos de experimentadores.

En un experimento típico, la radiación de sincrotrón emerge de un acelerador o de un anillo de almacenamiento a través de un tubo en que se ha hecho el vacío y que se une tangencialmente al anillo. Mirando hacia este tubo del haz mientras el acelerador funciona, se vería un punto brillante, normalmente de uno o dos milímetros de diámetro, centrado en el tubo. Este punto es una imagen del haz de electrones en el punto de su órbita en el que la radiación emitida tangencialmente se recoge a través del terminal.



filas ordenadas de los átomos de un cristal hacen las funciones de las rayas. Por último, el haz monocromático se dirige a la muestra, que puede ser un sólido o un gas. La cantidad de radiación absorbida, reflejada y transmitida contiene información acerca de la estructura del material.

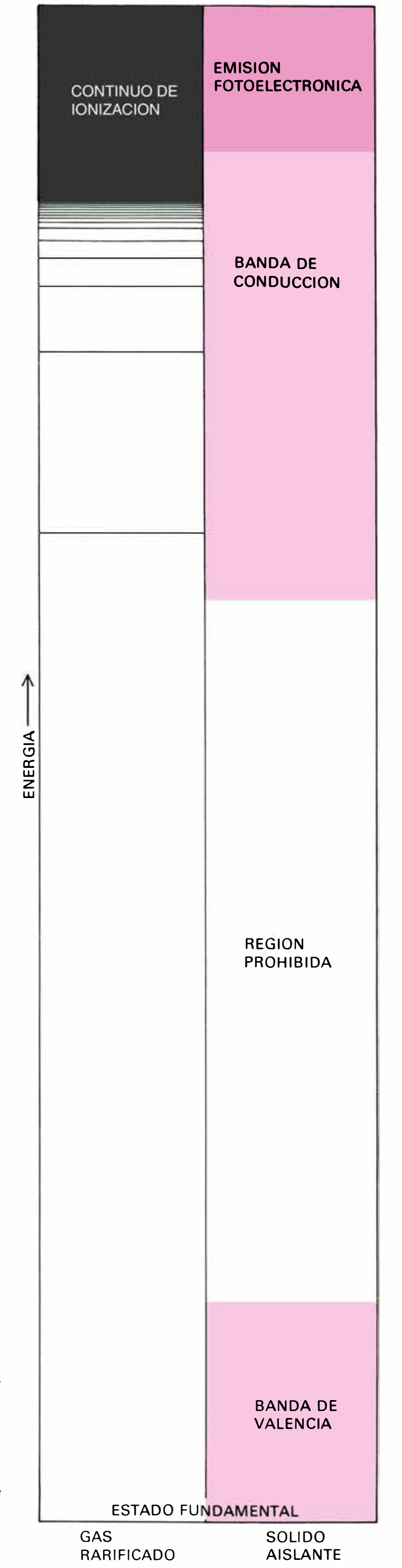
La radiación de sincrotrón se emite en un pincel bastante estrecho, pero en muchos experimentos se colima aun más y en general se selecciona una estrecha banda de longitudes de onda por medio de un monocromador situado al final de la línea del haz. Con las longitudes de onda de mayor interés, estas operaciones no pueden realizarse mediante elementos ópticos convencionales como los prismas y las lentes, ya que el cristal y los otros materiales absorben las longitudes de onda ultravioletas y de rayos X. Por el contrario, el haz debe manipularse mediante dispositivos reflectantes y tratándose de longitudes de onda más cortas, incluso éstos deben utilizarse a incidencia rasante.

Los espejos son de metal o cristal muy pulidos; para que puedan enfocar se pulen en superficies elípticas, hiperbólicas o parabólicas de poca curvatura. Para radiación ultravioleta de longitud de onda corta y para rayos X, incluso una superficie cuidadosamente pulida sería un mal reflector para un haz que incidiera en dirección cercana a la perpendicular, pero se puede lograr una reflectancia razonable cuando el haz resulte casi paralelo a la superficie. (Tal como la superficie relativamente rugosa de una carretera asfaltada se convierte en un espejo reflector cuando se mira desde un ángulo próximo a la superficie).

Los espejos focalizan el haz hacia la rendija de entrada de un monocromador. Para las longitudes de onda del ultravioleta, el elemento activo del monocromador es una red de difracción: una pieza de metal o cristal con muchas rayas o líneas muy juntas (miles por centímetro). Para las longitudes de onda de los rayos X, las hileras de átomos regularmente espaciados de un gran cristal, tradicionalmente cuarzo, pero ahora más corrientemente silicio o germanio, cumplen la misma función. Después de chocar con la red de difracción o el cristal, el estrecho haz se dispersa en un espectro, de la misma manera que un prisma dispersa la luz del sol en un espectro. El monocromador se ajusta luego para que una rendija de salida seleccione la longitud de onda deseada del conjunto de la radiación que haya sufrido la dispersión.

Puede parecer paradójico el tomarse grandes molestias para encontrar una fuente luminosa con un espectro continuo y desechar luego todas las longitudes de onda menos una. ¿Por qué no usar directamente una fuente lineal y eliminar el monocromador y el sincrotrón? La respuesta es que la salida del monocromador constituye el equivalente de una fuente de una línea ajustable, mientras que las verdaderas fuentes de una línea tienen siempre una longitud de onda fija. El paradigma experimental más usual consiste en medir alguna propiedad que varíe en función de la longitud de onda. Con fuentes de una sola línea la serie de mediciones debe hacerse con una fuente de radiación distinta para cada medición; el resultado es el muestreo de una propiedad a ciertas longitudes de onda discretas. Con una fuente continua, la función puede estudiarse a todas las longitudes de onda, a medida que el monocromador se va desplazando por todo su intervalo.

La primera, y en muchos aspectos la más sencilla, de las mediciones realizadas con la radiación de sincrotrón registró la absorción de radiación por gases. En experimentos de esta clase se hace pasar la radiación a través de una muestra de gas y se mide la intensidad de la radiación transmitida a medida que el



LAS ESTRUCTURAS ELECTRONICAS de un gas y de un sólido se diferencian principalmente en que los electrones de los átomos virtualmente aislados de un gas pueden ocupar sólo niveles de energía discretos, mientras que los de un sólido pueden tener cualquier energía dentro de una banda comparativamente ancha. El gas puede absorber sólo los fotones cuya energía corresponde a la diferencia de energías entre dos estados permitidos. El sólido tiene un espectro de absorción más aproximadamente constante. Los fotones con energía suficiente pueden expulsar un electrón de gas (ionización) o bien de un sólido (emisión fotoeléctrica).

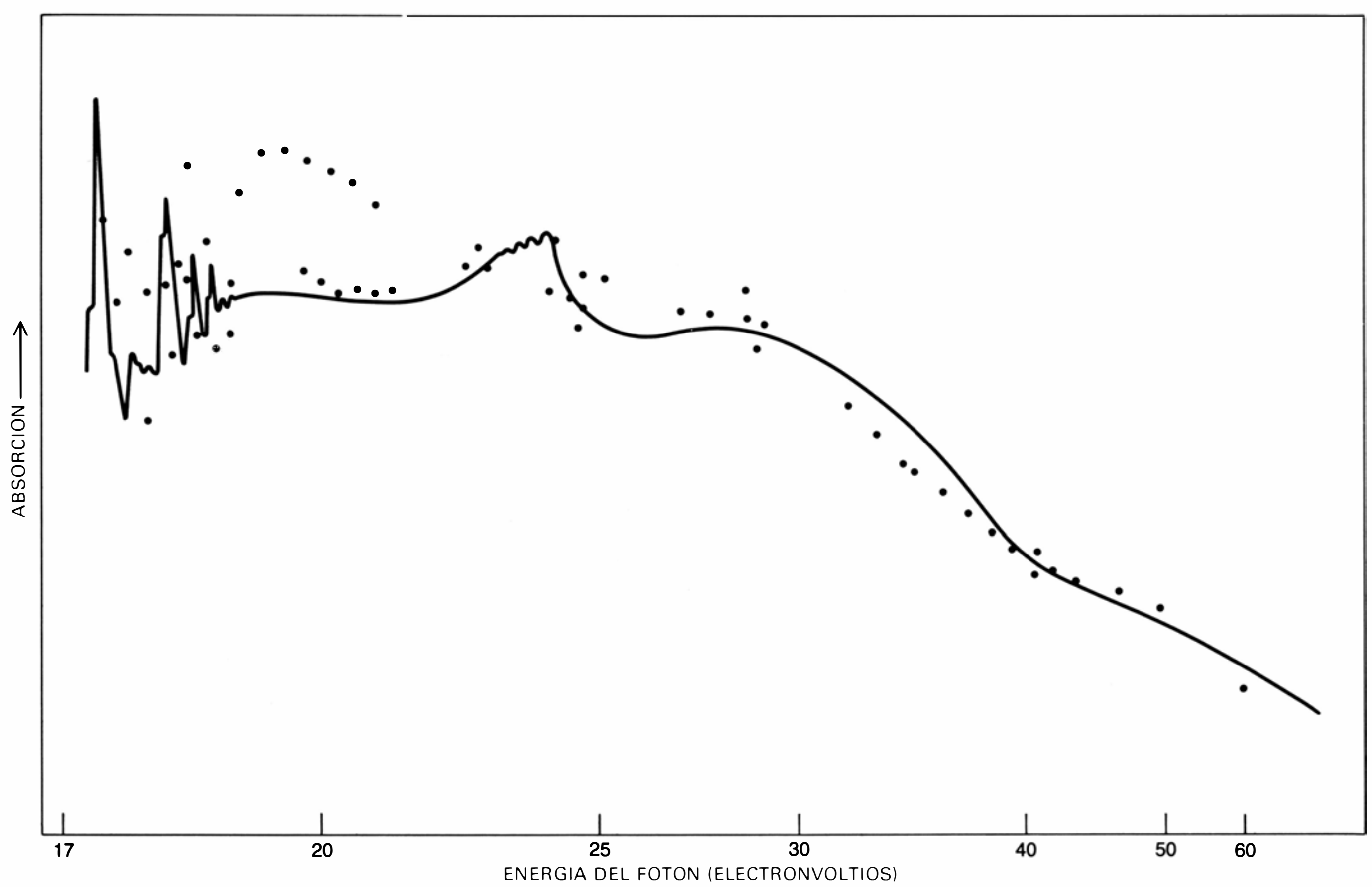
monocromador va recorriendo su intervalo de longitudes de onda.

Un átomo de un gas puede absorber radiación electromagnética sólo cuando el fotón incidente puede alterar de alguna manera el estado de un electrón del átomo. El proceso es el inverso de la emisión de fotones por átomos. Las transiciones entre los diversos estados orbitales posibles de un electrón originan líneas de absorción discretas. En el hidrógeno atómico, que es el sistema atómico más simple, las líneas espectrales se agrupan en series bien definidas, conocidas por el nombre de sus descubridores: Lyman, Balmer, Paschen, Brackett, Pfund. Si suponemos que el átomo está inicialmente en el estado fundamental (que es la condición para la serie de Lyman), existe una energía mínima por debajo de la cual no son posibles las transiciones. Un fotón cuya energía esté por debajo de ese umbral no será absorbido. Los fotones con una energía correspondiente a la diferencia de energías entre el estado fundamental y el primer estado excitado son absorbidos con gran facilidad, pero los que tienen una energía ligeramente mayor no lo son, hasta que se alcanza la energía del segundo estado excitado. Los estados excitados más elevados, en los que el electrón está sólo débilmente ligado, se hallan muy juntos y convergen hacia un límite: la energía de ionización. Cuando el átomo se ioniza, el electrón ya no está confinado a un espectro de estados discretos, y así todos los fotones cuya energía es mayor que el límite de ionización pueden ser absorbidos.

Aunque las reglas básicas de la espectroscopía atómica fueron formuladas hace más de 50 años, muchos aspectos de la interacción de la radiación electromagnética y los átomos, incluyendo algunos átomos simples, no se comprenden bien. Por ejemplo, en todos los átomos mayores que el hidrógeno es posible excitar dos electrones a la vez; el estado resultante no es simplemente la suma de las dos excitaciones componentes, ya que los dos electrones –que en mecánica cuántica se pueden considerar ondas– pueden interferir uno con otro. Tales excitaciones simultáneas se producen a un ritmo significativo sólo con un flujo intenso de fotones, de manera que la radiación de sincrotrón tiene ventajas sobre otras fuentes. Un electrón excitado puede interferir también con el "agujero" que deja detrás en su estado inicial.

Los gases constituidos por moléculas, y no por átomos simples, tienen también espectros interesantes, generalmente mucho más complicados que los espectros atómicos. Las moléculas poseen líneas de absorción –principalmente en longitudes de onda del infrarrojo– debidas a las vibraciones y rotaciones de la molécula. Cuando la energía de los fotones es mayor, la absorción molecular es continua, y lleva a la fragmentación de la molécula. La absorción de un fotón de alta energía puede liberar un solo electrón (ionización) o puede romper la molécula en átomos separados o grupos de átomos (disociación). Los estudios de los espectros de absorción y de los fragmentos creados, que se realizan cómodamente con radiación de sincrotrón, dan información sobre la química de las moléculas. Además, pueden revelar la energía de los enlaces interatómicos, la duración de los estados excitados y los canales de degradación de estos estados. Las velocidades de las reacciones químicas y las trayectorias seguidas por dichas reacciones pueden investigarse.

Los espectros de absorción no forman



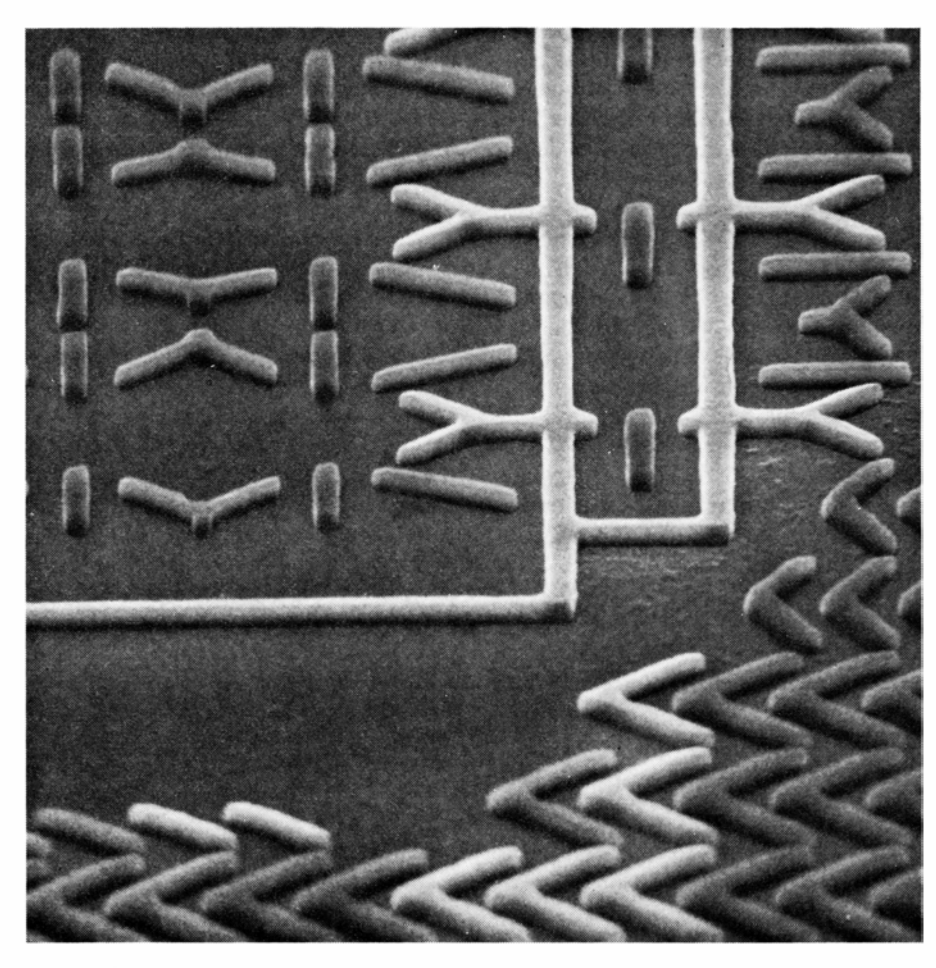
EL ESPECTRO DE ABSORCION del nitrógeno molecular (N_2) se midió con radiación de sincrotrón. Los máximos y mínimos del extremo izquierdo representan transiciones entre niveles energéticos electrónicos dentro de los átomos aislados de nitrógeno; la absorción continua a energías más altas proviene de la ionización. La serie de pequeños abultamientos en la curva cerca de los 23 electronvoltios se debe a las excitaciones rotacionales y vibracionales de las moléculas diatómicas. Los puntos son mediciones singulares de la absorción realizadas con fuentes lineales de emisión de radiación. La estructura del espectro de absorción se patentiza en las mediciones continuas con radiación de sincrotrón.

las únicas propiedades de los gases que pueden determinarse con la radiación de sincrotrón. Un átomo o molécula que ha absorbido un fotón puede, en algunos casos, disipar su energía de excitación emitiendo otro fotón de longitud de onda algo mayor; este fenómeno se llama fluorescencia. Estudiando el espectro de fluorescencia de un gas cabe deducir la vida media y el modo de desintegración del estado excitado. La naturaleza periódica de la radiación de sincrotrón sugiere una técnica experimental obvia: se ilumina la muestra con el breve destello de la radiación emitida cuando pasa el haz de electrones y entonces se detecta la fluorescencia durante el siguiente período de oscuridad. Si la vida media de la fluorescencia es mucho más larga que el período de revolución, el haz de electrones circulante puede desviarse (con un pequeño "impulso" magnético) de manera que la muestra sólo se ilumine una vez cada varias revoluciones.

Otra manera de investigar las propiedades de los gases es analizar la energía y la distribución angular de los electrones que se escapan de un gas iluminado. Mediante tales mediciones se llega a determinar cuál era el estado inicial del electrón emitido. En estos experimentos la energía de los fotones incidentes se mantiene constante y se examina la energía de los electrones expulsados. Analizando no sólo la energía de los electrones emitidos sino también su distribución espacial con respecto al haz polarizado incidente, puede determinarse la simetría del estado atómico inicial. De esta manera puede caracterizarse completamente el estado mecánico-cuántico del átomo.

La aplicación de la radiación de sincrotrón que ha sido realizada con mayor interés es la espectroscopía de los sólidos. Un sólido es un gran tablero de juego para los electrones, y los juegos que se llevan a cabo allí son complejos. Observar tales juegos con sólo unas pocas longitudes de onda discretas es como mirar el desarrollo de un partido de fútbol a través de cortas franjas de terreno. De tales datos, escasos y discontinuos, poco puede aprenderse sobre las reglas del juego.

En un sólido, los núcleos atómicos constituyen una red de cargas puntuales entre las cuales se dispersan los electrones. Además los electrones no están siempre confinados en la vecindad del átomo al que nominalmente pertenecen. Los enlaces iónicos químicos de los materiales aislantes representan una transferencia efectiva de carga de un átomo a otro. En los enlaces covalentes de los semiconductores la carga es compartida por dos átomos. En los metales las distribuciones de carga de los átomos se solapan y los electrones pueden moverse libremente por todo el sólido. Es evidente que el comportamiento de tales electrones itinerantes debe ser distinto del de los electrones de órbitas atómicas estables. En los sólidos cristalinos, el alto grado de simetría de la estructura atómica altera aun más las propiedades electrónicas.



LITOGRAFIA DE RAYOS X mediante radiación de sincrotrón, que proporciona alta resolución para la fabricación de dispositivos microelectrónicos. El mapa de la circuitería para tal dispositivo se deposita exponiendo una resina sensible a la luz a través de un estarcido. A las longitudes de onda visibles, la difracción difuminaría cualquier elemento de circuito de menos de dos o tres micrómetros. En el dispositivo que se muestra aquí las líneas más delgadas tienen un micrómetro de anchura. La configuración que se muestra parte de un dispositivo de memoria que manipula regiones de polaridad magnética invertida. La exposición la realizaron Eberhard A. Spiller y sus colegas.

Como la red de un cristal es periódica, la misma distribución de carga se encuentra en puntos equivalentes de todas las celdas del cristal. A causa de esta estructura periódica, un estado electrónico de un cristal ya no está completamente determinado por su energía, como lo estaba en el átomo aislado; también debe conocerse el momento, que define una dirección en el espacio. En un átomo, los niveles energéticos son nítidos; en un agregado amorfo, están ensanchados y forman bandas de energía; en un sólido cristalino, las bandas se convierten en funciones bien definidas de la energía y del momento.

No todos los electrones de un sólido forman bandas de energía, sino sólo los más externos, los orbitales de valencia. Los electrones internos, al estar más fuertemente ligados al núcleo y apantallados de su entorno por los electrones de valencia están poco afectados por la presencia de átomos vecinos. Con la radiación de sincrotrón puede explorarse, a la vez, la estructura de bandas de los electrones externos y el espectro de mayor energía de los electrones internos anteriormente inaccesibles.

Hay dos métodos principales para estudiar la espectroscopía del estado sólido. Ambos tienen en común la iluminación de la muestra con un haz de fotones de alta intensidad que en parte se absorbe, en parte se refleja y, si la muestra es lo bastante delgada o lo bastante

transparente, en parte se transmite. En un método se detectan los fotones reflejados o transmitidos. En el otro método se recogen y analizan los electrones emitidos por el material después de que se han absorbido los fotones.

Un experimento típico en espectroscopía de fotones mide la reflectividad: la relación entre radiación incidente y radiación reflejada en un intervalo de longitudes de onda. A partir de los datos de reflectividad se puede determinar la probabilidad de que un electrón del sólido absorba un fotón y se excite a algún estado final más energético. La dificultad estriba en descifrar el espectro de absorción que se obtiene de los cálculos, ya que no se conoce ni el estado inicial ni el final, sino sólo la diferencia de energía entre ellos.

A partir de estudios de los electrones expulsados de la superficie iluminada de un material puede obtenerse información adicional sobre la estructura electrónica de los sólidos. En la mayoría de las sustancias, el umbral para la emisión de fotoelectrones (análogo a la energía de ionización de los átomos), está en el ultravioleta, y la radiación de sincrotrón facilita grandemente el registro del espectro. En cierto tipo de experimento, en el que es indispensable una fuente sintonizable, se analiza simultáneamente las energías de los fotones incidentes y de los electrones detectados. El espectro resultante indica la distribución de los estados finales.

Un electrón expulsado de un sólido puede contener información acerca del estado inicial sólo si se escapa del sólido sin ser desviado por otros átomos. Por esta razón, la espectroscopía de fotoelectrones resulta particularmente útil en estudios de superficies: analiza las posiciones atómicas más exteriores. Las superficies son incluso más complicadas que el interior de los sólidos, pues la periodicidad de la red se interrumpe. Las superficies contaminadas por la adsorción de átomos y moléculas y agregados de moléculas cuesta muchísimo más describirlas. Las mediciones de la emisión de fotoelectrones han revelado profundos cambios en las propiedades ópticas a medida que una superficie limpia se va cubriendo progresivamente con una película monoatómica.

Los espectros de absorción de los sólidos pueden medirse de la manera tradicional –determinando la razón entre radiación transmitida y radiación incidente– tal como se miden los de los gases. La casi total opacidad de los sólidos complica las mediciones y exige que las muestras sean delgadas, es decir, de algunos centenares de angstroms de espesor.

En las longitudes de onda del ultravioleta y de los rayos X los espectros de absorción de los sólidos tienen "bordes" característicos en los que se cruza el umbral para la excitación de un electrón de una capa interna. Algunos de estos bordes son muy agudos, es decir, la absorción cambia drásticamente con un pequeño cambio en la longitud de onda. Cuando se observa un borde tal con un instrumento de alta resolución, es posible detectar los pequeños cambios del estado de los electrones más internos, ocasionados por cambios en la configuración de los átomos vecinos. Estos efectos sólo pueden verse mediante la radiación de sincrotrón ya que ninguna otra fuente de iluminación proporciona un continuo suficientemente intenso.

Hasta ahora, las posibilidades de la radiación de sincrotrón han sido explotadas principalmente en las longitudes de onda ultravioleta y de rayos X de baja energía. Los anillos de almacenamiento del SPEAR y del DESY dan acceso a los rayos X de alta energía; recientemente, varios investigadores han ideado técnicas para emplearlos. Entre éstas figura la investigación de la estructura fina de la absorción de los rayos X, que del espectro de absorción extrae información acerca de la dispersión de fotoelectrones ocasionada por átomos de la red que rodean el lugar desde donde se ha emitido el electrón.

La radiación de sincrotrón promete transformar la tecnología empleada en la fabricación de circuitos integrados. Estos dispositivos microelectrónicos se hacen mediante el trazado de sucesivas películas de circuitería en un sustrato de silicio u otro material semiconductor.

El mapa de la circuitería se define iluminando una fotorresina a través de una "máscara", o estarcido; las partes expuestas de la resina pueden eliminarse por lavado.

Las barreras actuales a una mayor reducción del tamaño de los circuitos integrados no proviene de las exigencias de los propios elementos del circuito ni de las limitaciones de la máscara. El tamaño mínimo viene establecido por efectos difractivos que hacen borrosa la estructura expuesta a través de la máscara. Debido a la difracción, los elementos del circuito hechos con luz visible no pueden ser inferiores a los dos o tres micrómetros, o inferiores a un valor situado entre 20.000 y 30.000 angstroms. La mejoría en la resolución obtenida a través de radiación de sincrotrón, al tener una longitud de onda de 20 angstroms, permite que los elementos del circuito se reduzcan a casi un micrómetro.

La misma fotorresina puede emplearse en un nuevo sistema de micrografía de rayos X. Una muestra, tomada quizá de una estructura biológica, se coloca en un medio uniforme de resina y se expone a la radiación de sincrotrón de corta longitud de onda. Se quita entonces la muestra y se extrae la resina. La estructura en relieve que queda es un gráfico tridimensional de la absorción de rayos X de la muestra.

La indicación más clara del interés de la comunidad científica en la radiación de sincrotrón es que la demanda de instalaciones ha superado la oferta. Se han formulado planes para mejorar las máquinas existentes y para construir al menos dos nuevos anillos de almacenamiento que se dedicarían por completo a generar radiación de sincrotrón.

El anillo de almacenamiento electrón-positrón del SPEAR tiene ahora dos terminales de radiación de sincrotrón, partidas de modo que den servicio a ocho estaciones experimentales. Están destinadas en principio a trabajar en longitudes de onda de rayos X de la mayor energía. Se tiene programado añadir siete líneas de haz para poder servir a 14 nuevos puestos experimentales. Además, un nuevo anillo de almacenamiento electrón-positrón, llamado PEP, está en construcción cerca del anillo SPEAR. Cuando el PEP empiece a funcionar en 1980, se espera que una proporción importante del tiempo de operación del SPEAR se destine a la investigación mediante radiación de sincrotrón.

En el Synchrotron Radiation Center de la Universidad de Wisconsin, donde ahora funciona el Tantalus I, se ha propuesto la construcción de un nuevo anillo de almacenamiento que se llamaría Aladdin. La máquina proporcionaría a la vez más energía (750 MeV) y mayor intensidad y tendría de 30 a 40 terminales de radiación.

Finalmente, se ha propuesto un dispositivo completamente nuevo de radiación de sincrotrón con dos anillos de almacenamiento para el Brookhaven National Laboratory. Un anillo comparativamente pequeño, que funcionaría a 700 MeV, generaría radiación de sincrotrón de longitudes de onda comprendidas entre el ultravioleta hasta los rayos X de baja energía. Los rayos X de alta energía se originarían en un anillo de almacenamiento mayor con una energía máxima de 2500 millones de electronvoltios.

La instalación de Brookhaven, que se llamará National Synchrotron Light Source, tendría un total de casi 50 líneas de haz.

Ciencia y sociedad

La opción del torio

En general, se reconoce que para que la fisión nuclear desempeñe un papel destacado en el abastecimiento de las necesidades mundiales de energía a largo plazo, es preciso desarrollar y poner en funcionamiento comercial, de modo generalizado, una nueva generación de reactores nucleares capaces de "reproducir" más combustible fisionable que el que consumen. El problema reside en que los reactores actuales están proyectados para funcionar siguiendo un ciclo de combustible de "una pasada", que extrae sólo una pequeña proporción de la energía disponible en el mineral natural de uranio, así como en el hecho de que el continuar dependiendo de reactores de este tipo agotaría gravemente, en cosa de décadas, las reservas de uranio económicamente recuperables del mundo.

El reactor reproductor promete aliviar la situación de abastecimiento de uranio generando nuevo combustible fisionable en una "zona fértil reproductora", hecha de material no fisionable naturalmente, que rodea el núcleo activo del reactor. Un núcleo atómico "fértil" situado en el material de reproducción se transmuta en un núcleo fisionable al capturar uno de los numerosísimos neutrones dispersos producidos por las reacciones en cadena de los núcleos fisionables del núcleo del reactor. De este modo, isótopos relativamente abundantes tales como el uranio 238 y el torio 232 pueden transmutarse en combustibles fisionables: plutonio 239 y uranio 233, respectivamente. Podría disponerse entonces de los nuevos combustibles para suplementar el abastecimiento de uranio 235, isótopo escaso y único material fácilmente fisionable que se encuentra en la naturaleza. De este modo, las reservas potenciales de combustible nuclear del mundo llegarían a ser prácticamente inagotables.

En numerosos países hay en marcha planes para separar el plutonio del combustible agotado de los reactores existentes, empleando métodos químicos, y para reciclar el plutonio como combustible nuevo, que se utilizaría primero en reactores de agua ligera y luego en reactores reproductores. Hasta ahora, las naciones que están realizando asimismo programas en gran escala para el desarrollo de reactores reproductores (Estados Unidos, Unión Soviética, Francia, Gran Bretaña, Alemania occidental y Japón) han concentrado sus esfuerzos casi exclusivamente en un solo enfoque: la reproducción de plutonio 239 fisionable a partir de uranio 238 fértil en reactores reproductores rápidos, enfriados por metal líquido (LMFBR).

El compromiso hacia una futura "economía plutónica" que estas tendencias implican ha sido puesto en tela de juicio por varias razones, entre las cuales quizá la más seria sea la preocupación de que al entrar en el circuito comercial mundial grandes cantidades de plutonio reprocesado y recién reproducido, ciertas naciones o grupos terroristas pudieran apartar cantidades de este material fácilmente fisionable a fin de construir armas nucleares. Se argumenta que, como mínimo, los intentos de salvaguardar el plutonio de calidad apropiada para hacer bombas contra robos criminales o contra su utilización por algún país, exigirá unos controles internacionales mucho más complicados y costosos que los ahora vigentes para proteger las cantidades mucho menores de plutonio que vienen mezcladas con productos altamente radiactivos de la fisión en el combustible agotado procedente de los reactores existentes.

La preocupación de que la diseminación de reactores nucleares reproductores de plutonio pudiese, por tanto, alentar la proliferación de armas nucleares ha llevado a dos investigadores de la Universidad de Princeton, Harold A. Feiveson y Theodore B. Taylor, a proponer que se piense en otro ciclo de combustible, más "resistente a la proliferación", para los reactores reproductores del futuro. En el esquema que proponen, el torio 232 (la única forma de torio que se encuentra en la naturaleza) reemplazaría la mayor parte del uranio 238 como principal isótopo fértil en el reactor reproductor. El material resultante se compondría del isótopo fisionable uranio 233, mezclado con bastante uranio 238 como para "desnaturalizarlo", es decir, para hacerlo inadecuado para su uso en armas nucleares sin una separación ulterior de isótopos, proceso físico complejo y costoso que ahora sólo pueden permitirse algunos países. No existen cantidades significativas de ningún isótopo que pueda ejercer el mismo efecto desnaturalizador respecto al plutonio.

Feiveson, experto en ciencias políticas, relacionado en otro tiempo con la Arms Control and Disarmament Agency, y Taylor, físico y ex-proyectista de armas nucleares, han expuesto con cierto detalle el ciclo reproductor que proponen, basado en el torio, en un estudio preparado para el Consejo de Relaciones Exteriores de los Estados Unidos. En dicho ciclo, el combustible nuevo suministrado a los diversos reactores nucleares nacionales no contendría material de calidad apropiada para fabricar armas. Este combustible se compondría de una mezcla de aproximadamente una parte de uranio 233, ocho partes de uranio 238 y entre cincuenta y ochenta partes de torio. Los tipos actuales de reactor, afirman estos científicos, podrían modificarse de manera que funcionaran con esta mezcla combustible. La fabricación de los conjuntos combustibles y toda la desnaturalización necesaria del uranio 233 podría realizarse en centros regionales sometidos a control internacional. Dichos centros realizarían también el reprocesamiento del combustible agotado procedente de los reactores de torio. Los centros regionales de reprocesamiento, agregan Feiveson y Taylor, "exigirían naturalmente las medidas típicas de seguridad contra robos de plutonio por parte de criminales o terroristas. Pero los combustibles frescos que se enviasen a las centrales nacionales y el combustible agotado devuelto a los centros regionales no constituirían objetivos atrayentes para ladrones: el combustible nuevo no tendría una calidad adecuada para armas y el combustible agotado sería tan radiactivo y tan diluido que prácticamente se protegería solo contra los robos y contra el ulterior procesamiento necesario para fabricar explosivos nucleares".

Suponiendo un ciclo de combustible en el cual el uranio 233 reciclado se desnaturalice con uranio 238, parece improbable que los tipos actuales de central nuclear pudiesen reproducir uranio 233 en cantidad suficiente como para automantenerse siguiendo un ciclo de torio. Sin embargo, mantienen Feiveson y Taylor, "podrían formar parte de un sistema global que sí sería autosuficiente si en los mismos centros regionales bajo con-

trol internacional en los que se reprocesaría el combustible pudiese proporcionarse alguna fuente adicional de uranio 233". En el estudio se examinan dos de tales posibilidades para suplementar con uranio 233 el ciclo propuesto de combustible de torio; ambos suponen la conversión de torio 232 en uranio 233 en el centro regional, ya sea en reactores reproductores rápidos que consuman plutonio o en el intenso ambiente neutrónico de unos reactores "convertidores" de fusión.

El estudio preliminar de la opción representada por el torio, realizado por Feiveson y Taylor, indica que sus características dependen en gran medida de la tasa de crecimiento que se suponga para la energía nuclear. En general, dicen esos autores, "la economía y los márgenes de flexibilidad del ciclo aparecen más atractivos en las proyecciones de las tasas de crecimiento de energía nuclear que muestran valores bajos que en las que los presentan altos".

Al argumentar en favor de una reevaluación completa de las opciones disponibles respecto a ciclos de combustible nuclear, Feiveson y Taylor han tenido el cuidado de señalar que "no consideramos al ciclo del torio ni siquiera a un abandono gradual y completo de la energía nuclear civil como alternativas a la economía del plutonio que pudiesen eliminar los riesgos de proliferación de armas nucleares. De todas maneras, seguirá siendo necesario proteger cuidadosamente contra robos a enormes cantidades de materiales nucleares apropiados para fines militares y, por supuesto, a las propias armas nucleares. Además, persistirán las presiones de naciones que desean adquirir armas nucleares, al menos mientras los estados que las tienen continúen comportándose como si se sintiesen más seguros con armas nucleares que sin ellas. Técnicamente, no vemos ninguna manera práctica de *impedir* que ninguna nación que realmente quiera armas nucleares, termine por adquirirlas".

Respecto del "futuro alternativo de fisión" que ellos mismos proponen, los antedichos autores expresan: "en la puesta en práctica de un ciclo de torio hay implicadas numerosísimas cuestiones técnicas e institucionales sin resolver; no tenemos la pretensión de que tras análisis ulteriores la opción del torio haya de parecer necesariamente muy atractiva, ya sea desde la perspectiva de la proliferación o desde otras perspectivas. Más bien, deseamos plantear el argumento de que, dadas ciertas características técnicas atractivas del reactor para el caso de usarse un ciclo de torio, y el hecho de que el uranio 233 y el uranio 235 pueden desnaturalizarse, mientras que no puede hacerse lo mismo con el plutonio, debería reexaminarse a fondo la actual tendencia mundial hacia el uso de un ciclo de reproducción de uranio-plutonio con preferencia a una opción basada en el torio, antes de que se adquieran compromisos irreversibles para llegar a una economía fundada en el plutonio".

Pregunta candente

Hay una perdurable leyenda que cuenta que en el año 212 a. C., durante el sitio de la ciudad de Siracusa realizado por el cónsul romano Marco Claudio Marcelo en la Segunda Guerra Púnica, los defensores incendiaron una flota romana enfocando los rayos del sol sobre los barcos de madera mediante un espejo ustorio (candente) que había sido diseñado por Arquímedes. Desde el siglo XVII, época en que se llegó a conocer mejor las propiedades de los espejos ustorios, los estudiosos de casi cada una de las generaciones siguientes han sentido la necesidad de confirmar o refutar la leyenda. En un número reciente de la revista *Technology and Culture,* D. L. Simms ha vuelto a examinar los hechos históricos y técnicos disponibles para tratar de determinar si la leyenda podía o no ser cierta.

Según Simms, de las afirmaciones inequívocas respecto de que Arquímedes incendió los barcos romanos enfocando sobre ellos los rayos del sol, la primera conocida es una sola frase escrita por Antemio de Tralles 700 años después del hecho. Antemio se refiere sólo a la "tradición unánime de que Arquímedes usó espejos ustorios para quemar la flota enemiga a la distancia de un tiro de arco". Ni el historiador Polibio (que escribía cuando aún vivían algunos de los combatientes de Siracusa), ni tampoco Livio y Plutarco (que escribieron detalladamente acerca del papel desempeñado por Arquímedes en el sitio de Siracusa) mencionan ninguna forma de fuego empleada como arma en la batalla, ni mucho menos un incendio provocado mediante un espejo ustorio. "Las pruebas históricas acerca de los espejos ustorios de Arquímedes son débiles y contradictorias en sí mismas", escribe Simms. "Las autoridades muy ulteriores en que se basa el relato no son de fiar, mientras las reconocidas y contemporáneas guardan silencio."

Simms pone asimismo en duda el que Arquímedes tuviese información suficiente a su disposición como para proyectar un espejo ustorio que funcionase. Suponiendo que el espejo hubiese sido lo bastante grande como para recoger energía solar suficiente para ese fin, tendría que haber tenido una forma parabólica y una distancia focal de unos 30 a 50 metros para llegar a formar un punto candente en un barco situado a tiro de arco. Además, probablemente, la distancia focal tendría que haber sido variable, o de otro modo el punto candente no podría haberse enfocado sobre un barco durante el tiempo suficiente como para incendiarlo, a menos que, por casualidad, el barco estuviese precisamente a tiro e inmóvil. La única manera conocida de construir un espejo grande de foco variable es instalar un conjunto ordenado de pequeños espejos planos cuya posición pueda regularse de modo que creen efectivamente una superficie con cualquier curvatura que se desee. Aun en el caso de que Arquímedes hubiese podido construir semejante espejo, no habría tenido modo de calcular el flujo radiante a una distancia dada del espejo, pues los conceptos necesarios para ese cálculo no existían. Sigue en pie el hecho de que en esa época se conocían bien espejos ustorios de menor tamaño. Sin embargo, en el mejor de los casos, las pruebas de que Arquímedes tuviese información suficiente como para hacer funcionar el arma son inconcluyentes.

A continuación, Simms investigó cuán eficaz habría sido en el campo de batalla un espejo ustorio grande y correctamente proyectado, examinando las condiciones en las que la luz solar concentrada enciende la madera e inicia un fuego sostenido. (Las velas de los barcos no habrían constituido un blanco, porque estaban recogidas cuando los barcos estaban anclados o atacando.) En las condiciones más favorables, un bloque inmóvil de madera, colocado exactamente en el foco de un espejo de gran distancia focal, demora por lo menos 30 segundos en encenderse. En otras palabras, es difícil imaginar cómo se podría haber mantenido un espejo ustorio enfocado sobre el material húmedo de un barco durante el tiempo suficiente como para incendiarlo. Un procedimiento mucho más eficiente habría consistido en lanzar cacharros de material inflamable sobre la cubierta.

"De manera que hay sobradas razones históricas, científicas y militares para llegar a la conclusión de que Arquímedes no usó como arma un espejo ustorio", escribe Simms. "Como arma bélica, el espejo ustorio tenía escaso valor, y la probabilidad de ser capaz de usarlo era con mucho demasiado pequeña."

Vida microbiana en las profundidades marinas

¿En qué medida afectan las bajas temperaturas y las elevadas presiones reinantes en los fondos oceánicos al metabolismo de las bacterias de las profundidades?

Holger W. Jannasch y Carl O. Wirsen

Desde los primeros trabajos realizados por los investigadores embarcados en la expedición oceanográfica del *Challenger* en 1872 se sabe que hasta en las mayores profundidades oceánicas puede hallarse vida. Ello significa que el 99 por ciento de la biósfera, delgada capa que rodea la superficie terrestre y que es el asiento de la vida, está formada por agua de mar. El total de producción vegetal y reciclaje de materia orgánica que se producen en tierra firme exceden a los que tienen lugar en el océano, pero sigue en pie el hecho de que cada día grandes cantidades de materia orgánica originada en aguas superficiales se hunden hacia el fondo del océano. Las poblaciones de animales y de microorganismos establecidas en el agua profunda dependen por completo de este material sedimentado para su existencia. Los microorganismos, en particular las bacterias, se encuentran por doquier en el océano. Es probable que su papel en el reciclaje de los restos vegetales y animales hasta convertirlos de nuevo en sales minerales sea semejante al que desempeñan en tierra. De estos procesos dependen la fertilidad y la productividad biológica de los océanos y también el uso humano, voluntario o involuntario, del mar como vertedero de restos orgánicos.

Las condiciones existentes en las profundidades marinas se caracterizan por su posición extrema. La luz prácticamente no penetra más allá de los 200 metros de profundidad, de modo que, más abajo, no pueden desarrollarse ya los organismos fotosintéticos. Excepto en algunas zonas determinadas, la temperatura de todos los océanos baja hasta unos pocos grados por sobre el punto de congelación a partir de unos cuantos centenares de metros de profundidad. Por cada 10 metros más de profundidad, la presión ejercida por el agua circundante aumenta en una atmósfera aproximadamente.

Para situar adecuadamente a las bacterias dentro del mundo de los seres vivos debe tenerse en cuenta que poseen la estructura básicamente sencilla de los organismos procariotas. La célula eucariota propia de los organismos más evolucionados parece ser que se ha desarrollado únicamente a partir de los últimos 700 millones de años; en ella, el material genético que se transmite a la próxima generación se segrega en el núcleo celular. En cambio, la célula procariota, que parece más antigua y primitiva, carece de membrana nuclear y el material génico se distribuye por todo el citoplasma de la célula. Todas las bacterias y algunas algas primitivas (las cianofíceas, denominadas también cianobacterias) son procariotas. Estos organismos figuran entre las formas más primitivas de vida sobre la tierra.

Las bacterias son organismos unicelulares, que, en general, se reproducen por bipartición. Determinadas formas de latencia son capaces de "resistir" en un estado de vida paralizada durante largos períodos. Las bacterias, ya sea activas, ya sea en reposo, son capaces de sobrevivir en condiciones extremas de temperatura y presión. Existen numerosos tipos fisiológicos bacterianos, cada uno de los cuales vive mediante distintas vías metabólicas para la oxidación y reducción de los compuestos orgánicos e inorgánicos.

No es fácil emprender el estudio de las bacterias que viven en el fondo de los océanos. Si se llevan hasta la superficie muestras de sedimento del fondo o bien de agua profunda y se añaden pequeñas cantidades de nutrientes adecuados, en general se observa un profuso desarrollo de poblaciones bacterianas. Evidentemente, en el laboratorio estas bacterias suelen cultivarse sin las limitaciones que suponen las bajas temperaturas y las elevadas presiones propias de su medio ambiente original. Los primeros experimentos de laboratorio ideados para someter a dichos organismos de las profundidades a las mismas presiones que se registran en los distintos niveles del océano fueron realizados a finales de 1940 por Frank H. H. Johnson, de la Universidad de Princeton, y Claude E. ZoBell, de la Scripps Institution of Oceanography. Al cultivar sus cepas bacterianas en recipientes adecuados para soportar elevadas presiones hallaron que el incremento de la presión afectaba negativamente al metabolismo de las bacterias y la actividad de los enzimas bacterianos aislados. No obstante, encontraron también que no todas las cepas se veían afectadas de igual manera: el grado de barotolerancia variaba mucho de un cultivo bacteriano a otro.

Estos experimentos y otros del mismo tipo presentaban un obvio inconveniente: las bacterias sufrían una fuerte descompresión al ser extraídas de las profundidades marinas antes de que pudiera restablecerse su presión ambiental normal. Actualmente, y gracias al desarrollo de nuevas concepciones con respecto a la tecnología de las elevadas presiones y los nuevos conocimientos adquiridos sobre las profundidades marinas se puede encarar frontalmente este problema. Hasta ahora, cuando las muestras de bacterias marinas aisladas a grandes profundidades llegaban al laboratorio habían experimentado descompresiones de varios centenares de atmósferas durante períodos variables de tiempo. Esta descompresión, que suele ser fatal para cualquier organismo superior, no parecía



SUBMARINO PARA INVESTIGACION. El *Alvin* se ha encargado de situar y recoger la mayoría de los artilugios experimentales descritos en este artículo. La fotografía recoge el momento de iniciar una inmersión; puede descender hasta 3700 metros. El equipo se halla en la proa.

DOS EXPERIMENTOS DE DEGRADACION realizados a una profundiad de 1830 metros. Los cuatro compartimientos de la caja de plexiglás *(primer plano)* llevan un cebo de material orgánico. Una serie de mallas de distinto poro restringen el acceso de animales bentónicos al cebo. El bastidor cilíndrico *(segundo plano)* contiene 20 botellas llenas de nutriente. Al alcanzar el fondo, las botellas se llenan de agua de mar.

afectar adversamente a muchas de las bacterias. Al menos, algunas florecían al proporcionárseles nutrientes en el laboratorio.

No obstante, el hecho de que estas poblaciones mixtas de bacterias hubiesen sido sometidas a descompresión planteaba diversos interrogantes. ¿La actividad de las bacterias que crecen en el laboratorio era la misma que presentan en las profundidades marinas? ¿Existían bacterias que no lograban sobrevivir a la descompresión? En tal caso, ¿se encuentran estas bacterias específicamente adaptadas a las condiciones que imperan en los niveles profundos del océano? Son muy conocidas las adaptaciones bacterianas de este tipo con respecto a los límites de temperatura tolerados.

Las bacterias que se desarrollan sin dificultad a bajas temperaturas reciben el nombre de psicrófilas o amantes del frío. Sin embargo, no crecen con mayor rapidez a bajas temperaturas que otras bacterias no psicrófilas a temperaturas altas. Soportan sencillamente temperaturas bajas a las que otras bacterias son incapaces de crecer. Tal vez no sobrevivan a temperatura ambiental y cuando se las aísla del agua de mar fría y se las cultiva, la temperatura debe mantenerse por debajo de los 18 grados Celsius constantemente.

Cabe que las bacterias barotolerantes se comporten de forma parecida y que, para ellas, la descompresión resulte fatal. Esto podría regir en particular con aquellas cepas que se han descrito como barofílicas o amantes de la presión. Estos organismos se desarrollarían con mayor rapidez a presiones elevadas que a la presión atmósferica normal. La búsqueda de pruebas de este tipo de adaptación parecía constituir una tarea muy meritoria.

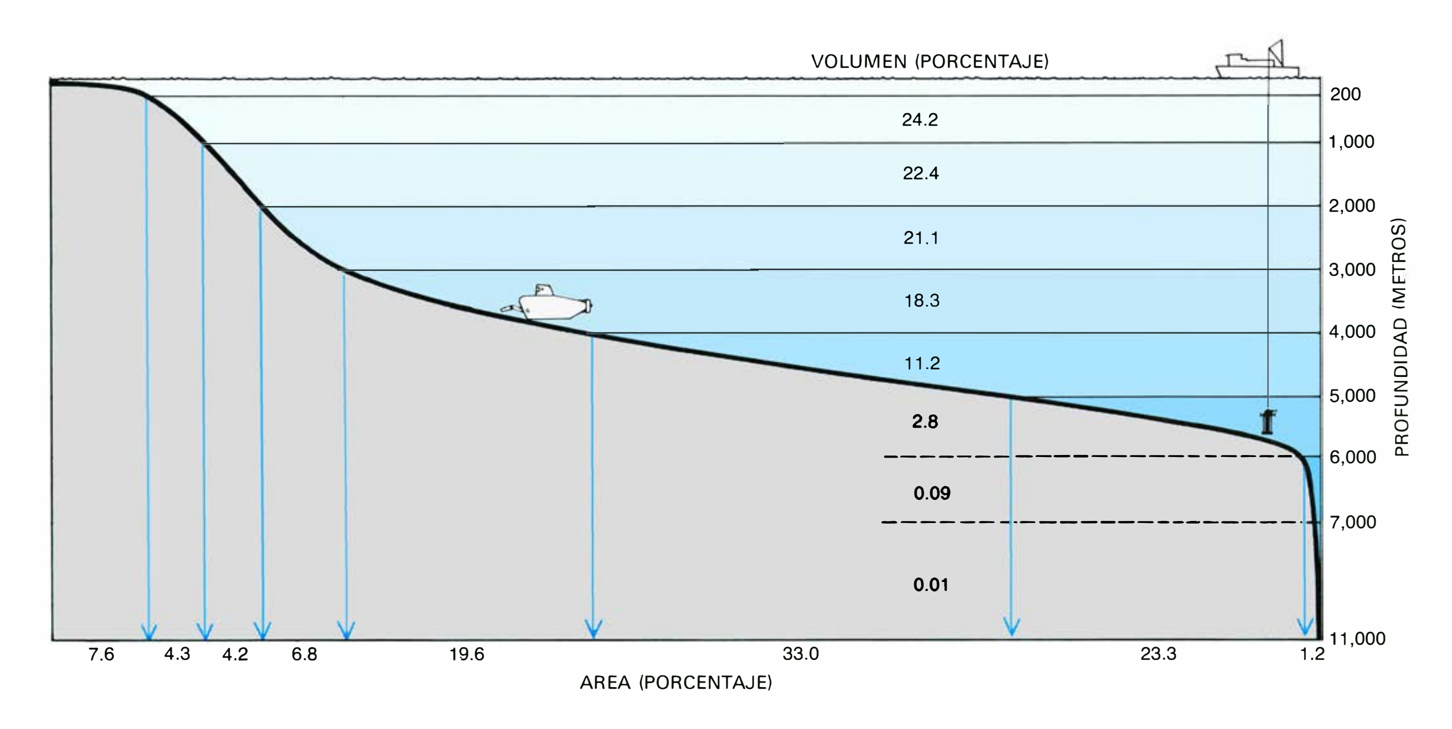
Al principio, el montar esta búsqueda parecía exigir una inversión tan cuantiosa en complejos aparatos como para que fuese inalcanzable en un futuro previsible. Esta era nuestra posición hasta que un incidente producido en 1968 sugirió un nuevo enfoque. Fue entonces cuando el *Alvin,* un batíscafo que iniciaba su tercer año de uso en investigaciones en la Woods Hole Oceanographic Institution, se hundió accidentalmente a 1540 metros de profundidad a unos 200 kilómetros al sur de la isla de Nantucket, en el momento en que se disponía a realizar una inmersión. El piloto y dos científicos lograron escapar, pero abandonaron a bordo su almuerzo, lo que constituyó el inicio de un experimento inesperado.

Si este experimento se hubiera presentado al concurso de una ayuda a la investigación se le hubiera dado el título rimbombante de "Estudio de la biodegradación de determinados tipos de materia orgánica en las condiciones ambientales del fondo marino". En él se hubiera podido describir el aparato como un recipiente de plástico ideado para excluir a cualquier organismo que no fuera microscópico y en los substratos para la biodegradación hubiera podido incluirse a hidratos de carbono, proteínas tanto en forma líquida como sólida, grasas y una muestra de material vegetal intacto. Si se traducen adecuadamente estos conceptos, ello quiere decir que el almuerzo estaba compuesto de un consomé, un bocadillo de salchichón con mahonesa y un postre de manzana.

Cuando el *Alvin* fue rescatado a la superficie a los once meses de su inmersión, la comida se encontraba en un estado de conservación notablemente bueno. De inmediato se la refrigeró y se la mantuvo a una temperatura equivalente a la de las profundidades marinas: 3 grados Celsius. Al cabo de unas semanas, la comida se había estropeado.

Este experimento fortuito planteó una serie de observaciones intrigantes pero no concluyentes todavía. Lo más importante fue que condujo a unas nuevas concepciones: sin mayores dificultades sería posible realizar unos experimentos parecidos, pero bajo condicioes reproducibles y rigurosamente definidas. Bastaría para ello unir paquetes de muestras a los cables de amarre empleados en varios experimentos de oceanografía física en marcha entonces.

Podíamos dejar en incubación las muestras durante un período de tiempo comprendido entre dos y seis meses a profundidades hasta de 5300 metros. El



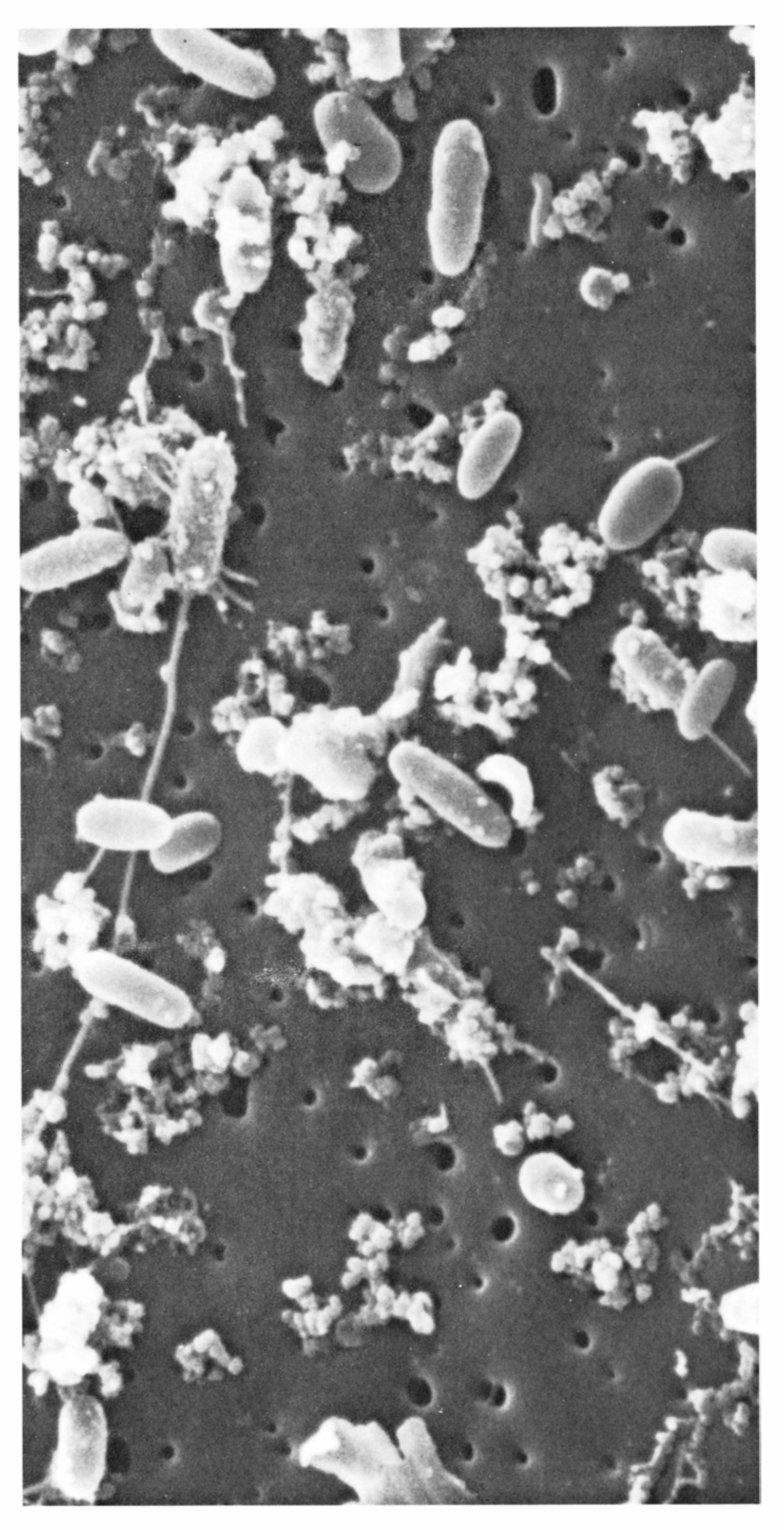
EN LAS PROFUNDIDADES, el agua situada a 1000 metros ocupa el 75 por ciento del volumen total del océano. La capa superfcial, altamente productiva, de 200 a 300 metros de profundidad, y el agua abisal (la de más de 6000 metros) suponen sólo una pequeña parte del volumen total.

crecimiento bacteriano y la actividad metabólica soportada por los diversos nutrientes de cada paquete no se produciría en el laboratorio sino bajo las condiciones normales en las grandes profundidades, es decir, elevada presión y baja temperatura. Tras recoger los cables de amarre se podría determinar el crecimiento y el nivel de actividad metabólica de las bacterias incubadas al medir la cantidad de nutrientes consumidos o transformados durante el período de inmersión.

Nuestra estrategia de trabajo se ajustó a este modelo, al sumergir una serie de recipientes que contenían distintos cultivos puros o bien poblaciones naturales de bacterias asociadas con nutrientes sólidos o líquidos de distintos tipos. En cada caso se preparó un duplicado de control exactamente igual, pero fue incubado en el laboratorio a una temperatura equivalente a la del agua que rodeaba a los recipientes sumergidos en condiciones naturales: de 2 a 3,5 grados Celsius. Los recipientes de control se incubaron en condiciones normales de presión atmosférica.

Uno de los nutrientes utilizados fue carne fresca de pescado, material complejo y sumamente degradable. Este material se degradó mucho más lentamente a 5300 metros de profundidad que en el caso de las muestras de control mantenidas en el laboratorio. Otros substratos utilizados fueron el agar (producto de ciertas algas marinas), quitina (componente principal del exoesqueleto de numerosos invertebrados marinos), gelatina (nutriente proteico) y almidón (un carbohidrato). A la vez fue posible realizar medidas cuantitativas gracias al empleo de nutrientes marcados con sustancias radiactivas. Por ejemplo, mediante el empleo de carbono radiactivo fue posible medir con exactitud la incorporación por parte de las células bacterianas del carbono procedente de carbohidratos, de aminoácidos o de ácidos grasos y medir también la cantidad de dióxido de carbono producida por respiración. La tasa de metabolismo de las bacterias incubadas en aguas profundas fue muy inferior, en todos los casos, a la de los controles mantenidos en el laboratorio; la tasa fue 100 veces inferior en muchos casos.

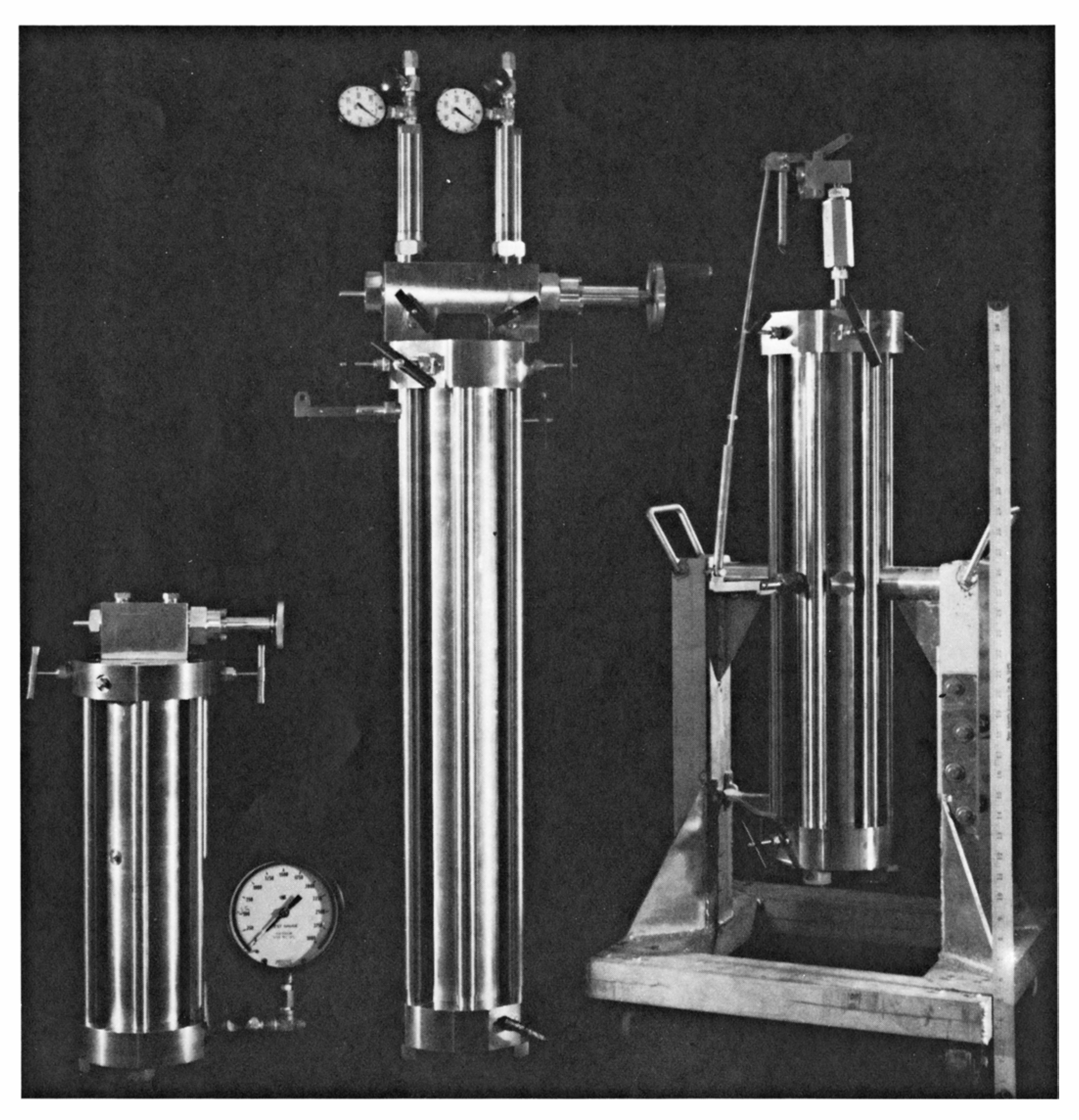
Las bacterias utilizadas en nuestros primeros experimentos procedían de aguas superficiales. Esperábamos obtener resultados todavía más importantes en el caso de utilizar exclusivamente bacterias que siempre habían estado sometidas a las condiciones reinantes en el fondo y que, a buen seguro, estaban adap-



BACTERIAS PROCEDENTES DE NIVELES PROFUNDOS, recogidas a 4400 metros con un sacamuestras provisto de una fina membrana filtrante; las bacterias aparecen como ovoides alargados y delgados filamentos en esta microelectrografía de barrido. Los agujeros irregulares son los poros de la membrana; los gránulos repartidos entre bacterias son artefactos debidos a la fijación.

tadas a esas condiciones. Con ese fin ideamos un aparato más complejo. Usamos recipientes que contenían nutrientes estériles y que estaban cerrados con un tapón de caucho. Cada tapón tenía una rendija que permanecía herméticamente cerrada después de que la botella se hubiese llenado en el fondo del océano.

Los recipientes se colocaron dentro de una cámara de aluminio capaz de resistir elevadas presiones (un cilindro con una tapa de quita y pon, provista de una válvula que podía abrirse desde el exterior). Mediante el *Alvin* se llevaron uno o más de estos recipientes a dos puntos, definidos en el océano Atlántico frente a Cabo Cod, uno a 1830 y el otro 3640 metros de profundidad. Una vez situado y fondeado el *Alvin* en un lugar elegido, el piloto usaba el brazo mecánico del batíscafo para abrir la válvula del recipiente, permitiendo que se llenara de agua o con una mezcla de agua y sedimento del fondo. La presión existente a estas profundidades forzaba al agua o al barro a penetrar a través de las ranuras practicadas en los tapones de caucho, con lo que se inoculaba el medio de cultivo estéril dispuesto en las botellas. El hecho de que se igualara la presión entre el



LOS MUESTREADORES MICROBIOLOGICOS de profundidad están formados por dos recipientes de acero *(izquierda y derecha)* capaces de mantener la presión de las muestras de agua tomadas respectivamente a 2000 y 6000 metros de profundidad máxima. A estas honduras las presiones son aproximadamente de 200 y 600 atmósferas. Los dos recipientes sirven también de incubadores cuando se añaden nutrientes a través de una unidad de transferencia *(ápice del recipiente, izquierda)*; la muestra de agua de mar penetra al interior del recipiente mediante un mecanismo de disparo. Un sacamuestras más complicado *(centro)* posee un filtro que concentra el contenido microbiano del agua. La unidad de trasferencia, en el ápice del sacamuestras, sirve para retirar la muestra concentrada a la vez que mantiene las presiones existentes en el fondo.

interior y el exterior de la cámara después de llevarse ésta, permitía que el brazo mecánico del batíscafo retirara la tapa, levantara un bastidor que sostenía las botellas y los depositara en el fondo del océano. Las botellas se retiraban en la próxima visita a la misma estación, para su análisis a bordo del barco.

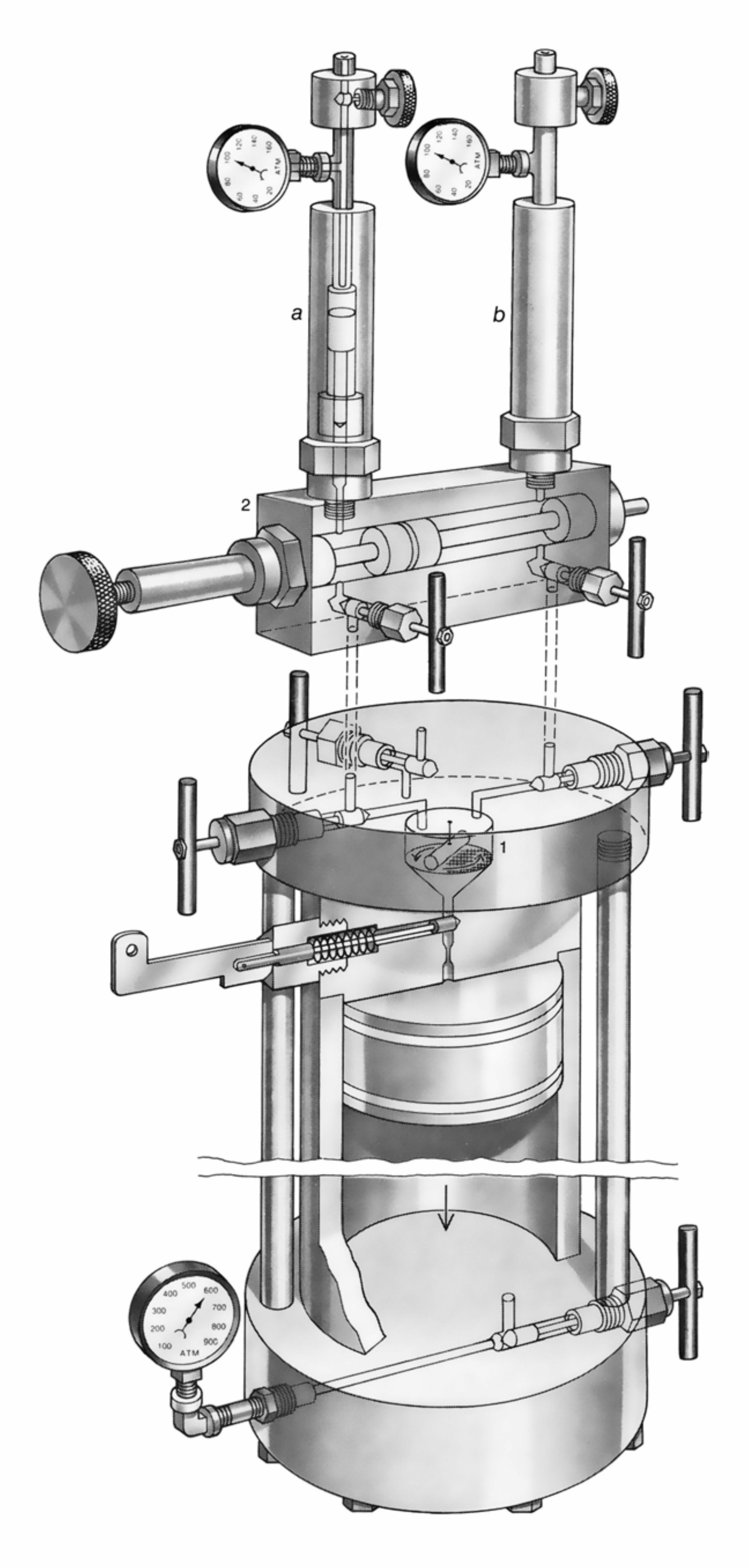
Los resultados de estos experimentos *in situ,* que han permitido estudiar el desarrollo de las bacterias no sometidas a descompresión, han sido sorprendentes. Después de períodos de incubación de dos a 15 meses, se ha hallado que la baja tasa de utilización de los nutrientes por parte de la flora bacteriana de profundidad es aproximadamente igual a la encontrada al trabajar con las bacterias procedentes de la superficie. Al parecer, no hubo bacterias barofílicas activas. En cuanto a las bacterias barotolerantes, para distinguirlas de las barofílicas, no parecía que hubiese una abundancia de ellas entre las poblaciones originarias del mar profundo mayor que entre las bacterias presentes en aguas superficiales.

Al revisar nuestra experimentación aún pudimos advertir dos desventajas que podrían evitarse. En primer lugar, nuestro sistema nos proporciona únicamente una medición final de la actividad metabólica de los organismos y no unas mediciones día a día; por tanto, no nos pudo indicar si su actividad fue constante a lo largo de todo el período de incubación. En segundo lugar, el brusco equilibrio de presiones internas y externas al abrir la válvula del recipiente exponía a las bacterias a un choque de presión y a elevadas fuerzas de corte. Era evidente que en futuros experimentos debíamos eliminar ambas desventajas. Vimos sólo un modo de hacerlo: inventar un dispositivo que recogiese poblaciones bacterianas del fondo del océano suavemente y las mantuviese a su presión y temperatura originales durante su traslado al laboratorio, donde se podría medir paso a paso la respiración y la asimilación de nutrientes.

El diseño de un recipiente que cumpliera estas condiciones parecía difícil a primera vista; pero para conseguirlo nos ayudaron Clifford L. Winget y Kenneth W. Doherty, ingenieros de Woods Hole con experiencia en proyectar aparatos útiles en profundidades marinas. El primero de estos sacamuestras (muestreadores) fue construido y ensayado con éxito en 1973. Actualmente tenemos dos en funcionamiento: uno puede soportar presiones hasta de 200 atmósferas (profundidad máxima de trabajo: unos 2000



EL MUESTREADOR MICROBIOLOGICO se hace bajar mediante un torno para recoger muestras de agua de mar hasta profundidades de 6000 metros y presiones hasta de 600 atmósferas. Una placa central divide el sacamuestras en dos cilindros; un orificio practicado en la placa *(1)* sirve como atenuador del flujo. Antes de entrar una muestra, el pistón flotante superior *(en negro)* se mantiene al tope del cilindro, sostenido por una columna de agua dulce; el pistón inferior está también al tope de su cilindro, sostenido por nitrógeno gaseoso a presión. Cuando se abre la toma (no representada) y permite la entrada de una muestra de agua de mar, el pistón superior desciende lentamente conforme el agua dulce penetra a presión en el cilindro inferior *(en color).* A su vez, el pistón inferior desciende, comprimiendo al nitrógeno hasta que se igualan la presión interna y la externa. En ese momento, se cierra una válvula de retención y el muestreador se iza a la superficie. El muestreador está suficientemente aislado como para mantener la temperatura de la muestra igual a la del mar profundo hasta que se la refrigera a bordo del barco. Una unidad de transferencia *(2)* permite extraer pequeñas submuestras e introducir nutrientes sin que se pierda presión.



MUESTREADOR FILTRANTE, ideado para mantener muestras a presiones hasta de 600 metros. El aparato concentra unas 200 veces el contenido de microbios y de materia orgánica presente en tres litros de agua de mar mediante su paso a través de una fina membrana filtrante *(1)*. La presencia de un solo pistón con un atenuador de flujo, parecido al de otro muestreador sin filtración, evita el choque debido a la presión y elimina las fuerzas de corte que se producen al abrir la toma (no representada). Una unidad de transferencia especial *(2)* está provista de pequeños amortiguadores gaseosos *(a, b)* que evitan la pérdida de presión durante un almacenaje prolongado. La muestra concentrada se trasvasa total o parcialmente a una o más unidades de transferencia a la misma presión y se almacena a la temperatura propia del punto de toma a bordo del buque. Al regresar al laboratorio de tierra, las muestras se trasladan entonces a cámaras de incubación a presión.

metros) y otro hasta presiones de 600 atmósferas (máxima profundidad de muestreo: 6000 metros).

Para obtener las muestras situamos al muestreador al extremo de un cable: una vez alcanzada la profundidad deseada se envía por el cable un peso que recibe el nombre de "mensajero". Al llegar al dispositivo golpea una pequeña palanca que abre la válvula de llenado. El interior cilíndrico del muestreador está dividido en dos cámaras mediante una placa perforada con un diminuto orificio que actúa como freno del flujo. Por encima y por debajo de la placa se disponen dos pistones libres. Antes de que se abra la válvula de llenado, el pistón superior se apoya contra el extremo superior del cilindro, sostenido por un volumen de agua dulce estéril: el pistón inferior se apoya contra la placa divisoria, sostenido por un amortiguador constituido por nitrógeno a presión.

Al abrirse la válvula de llenado se eliminan a un tiempo las diferencias iniciales de presión y las fuerzas de disgregación merced a la incompresibilidad del agua dulce que pasa a través del pequeño orificio de frenado. La velocidad de descenso del pistón está predeterminada por el ajuste del freno de flujo de la placa, que permite la entrada de agua en la mitad inferior del cilindro. El agua, al entrar, empuja hacia abajo al pistón inferior y con ello produce la compresión en el amortiguador de nitrógeno. Al cabo de unos 20 minutos ha logrado penetrar un litro de agua de mar en el ápice del cilindro, revestido del teflón, y la presión del amortiguador gaseoso situado en la parte inferior del dispositivo se equilibra con la presión externa. Tras esto, se cierra una válvula de retención y el sacamuestras se iza a bordo y se traslada a una cámara fría en donde se mantiene la temperatura del mar profundo. La función del amortiguador es evitar la pérdida de presión debida a la expansión del recipiente, a la compresión de las juntas tóricas y a la fijación de los manómetros.

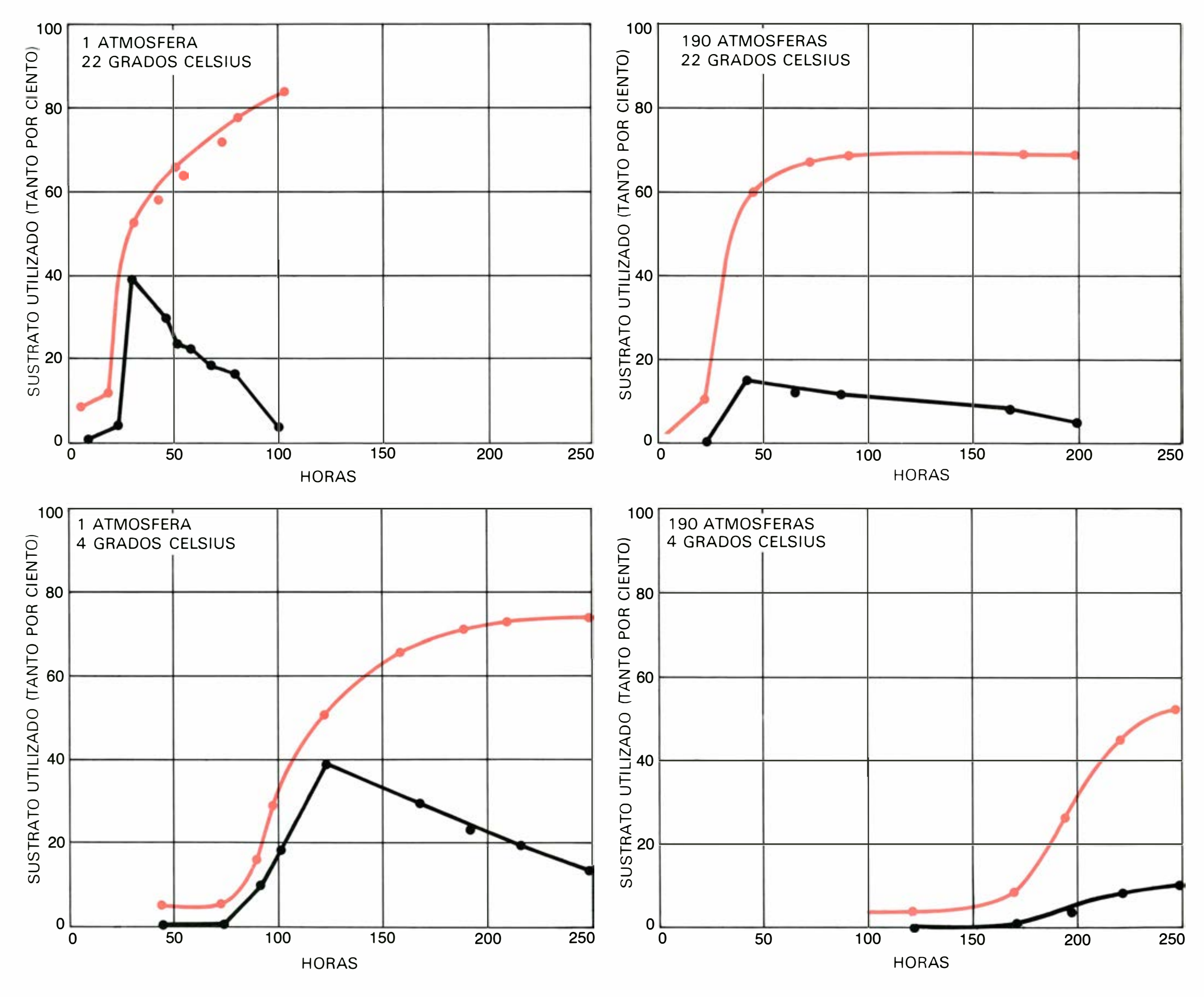
Una vez obtenida la muestra se inician los experimentos acerca de la absorción de nutrientes y de la respiración bajo presión. El sacamuestras se usa ahora como una cámara de incubación, provista de un agitador magnético. Se añade y se retira simultáneamente una serie de submuestras de un volumen máximo de 13 mililitros, que contiene nutrientes marcados con isótopos radiactivos, mediante una sencilla unidad de transferencia. Antes de unir esta unidad de transferencia a la cámara de incubación, se llena por completo con un me-

dio líquido consistente en un nutriente o en agua de mar estéril. Al abrir las válvulas de conexión, la escasa compresibilidad del medio se compensa fácilmente mediante el amortiguador de nitrógeno situado en la sección inferior de la cámara de incubación. El pistón de la unidad de transferencia se desplaza de un lado al otro mediante una manivela accionada a mano, con lo que penetra un volumen de medio equivalente al de muestra que es retirado. Una vez cerradas todas las válvulas de conexión, la submuestra contenida en la unidad de transferencia se somete a descompresión y se usa para análisis. Este procedimiento se repite cada hora, día a día o bien a intervalos mayores. Se estudia una población control a presión atmosférica.

Con los dos muestreadores descritos pudimos obtener dos muestras de bacterias de profundidad a lo largo de una campaña oceanográfica, pero ninguna más. Con el fin de incrementar la eficiencia del muestreo ideamos un sistema de concentración de las muestras *in situ* mediante filtración y de almacenamiento ulterior de las muestras concentradas en unas unidades de transferencia especialmente diseñadas. En este nuevo sacamuestras filtrante pasan tres litros de agua a través de una membrana filtrante de poro muy pequeño, concentrando unas 200 veces el contenido de microorganismos, dejando un volumen final de 15 mililitros.

Debido a las dificultades técnicas inherentes a los estudios de muestras de aguas profundas, las observaciones no pueden comprobarse fácilmente ni tampoco respaldarse mediante otras nuevas, motivo por el cual dichas observaciones frecuentemente reciben más atención que la que en realidad merecen. Para que los datos obtenidos fueran valederos sería necesario que fueran reproducibles y estuviesen respaldados por controles significativos. La ventaja del sistema de muestreo por filtración radica en la aceleración del proceso de recolección de datos.

Los resultados de nuestros trabajos de laboratorio con muestras de mar profundo en los dos últimos años han corroborado en general los conseguidos con nuestros anteriores experimentos de incubación *in situ.* Es decir, las elevadas presiones y bajas temperaturas existentes en las profundidades marinas tienen el mismo



DISTINTAS CEPAS BACTERIANAS recogidas de poblaciones naturales halladas en aguas superficiales, se sometieron a ensayos respecto a la asimilación de carbono *(negro)* y la respiración *(color)* a distintas condiciones de presión y temperatura. Tanto la elevada presión como la baja temperatura afectaron su actividad; la presión afectó en mayor grado a la asimilación de carbono que al proceso de la respiración.

efecto sobre las poblaciones bacterianas del fondo oceánico que no han sufrido descompresión que sobre las bacterias recogidas en niveles superficiales. En general se produjo un incremento en la actividad de las poblaciones bacterianas de fondo cuando se las liberó de la limitación ocasionada por la elevada presión de su entorno normal. Dicho de otro modo, aunque el grado de barotolerancia varía entre las distintas bacterias, en los estudios antedichos no se ha detectado ninguna respuesta que sea genuinamente barofílica.

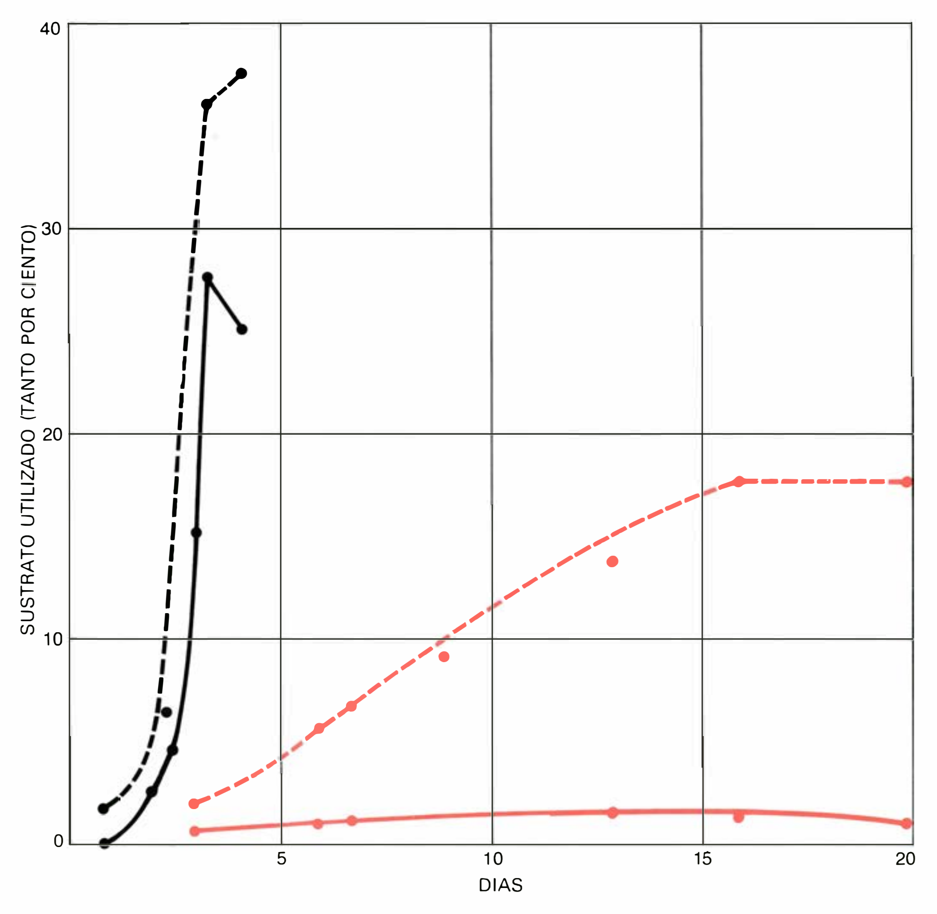
¿Significa esto que no existe tal tipo de bacterias? No necesariamente, y por dos razones. En primer lugar, es probable que la respuesta barofílica dependa del tipo de nutriente suministrado. Por ejemplo, uno de los nutrientes marcados que hemos ensayado es el acetato y nuestros datos más recientes señalan que las actividades metabólicas de las bacterias al utilizar este nutriente son bastante distintas de las que muestran con glutamato y una mezcla de aminoácidos. Es necesario continuar con esta observación. En segundo lugar, todas las muestras probadas hasta el momento han sido de poblaciones naturales mixtas de bacterias. Si se piensa cuántas de estas formas pueden ser bacterias de superficie que han llegado hasta el mar profundo por sedimentación, puede suponerse que a pesar de sus bajas actividades metabólicas, oculten debido a sus elevadas concentraciones las de otras poblaciones menos numerosas adaptadas a las condiciones de elevada presión. La última palabra acerca de si existen o no bacterias verdaderamente barofílicas sólo podrá pronunciarse después de que podamos estudiar cultivos puros de cepas aisladas de profundidad que no hayan sufrido descompresión.

Los peces y los invertebrados (crustáceos y equinodermos) que viven en el bentos del océano se alimentan de los restos fragmentados de otros animales marinos.

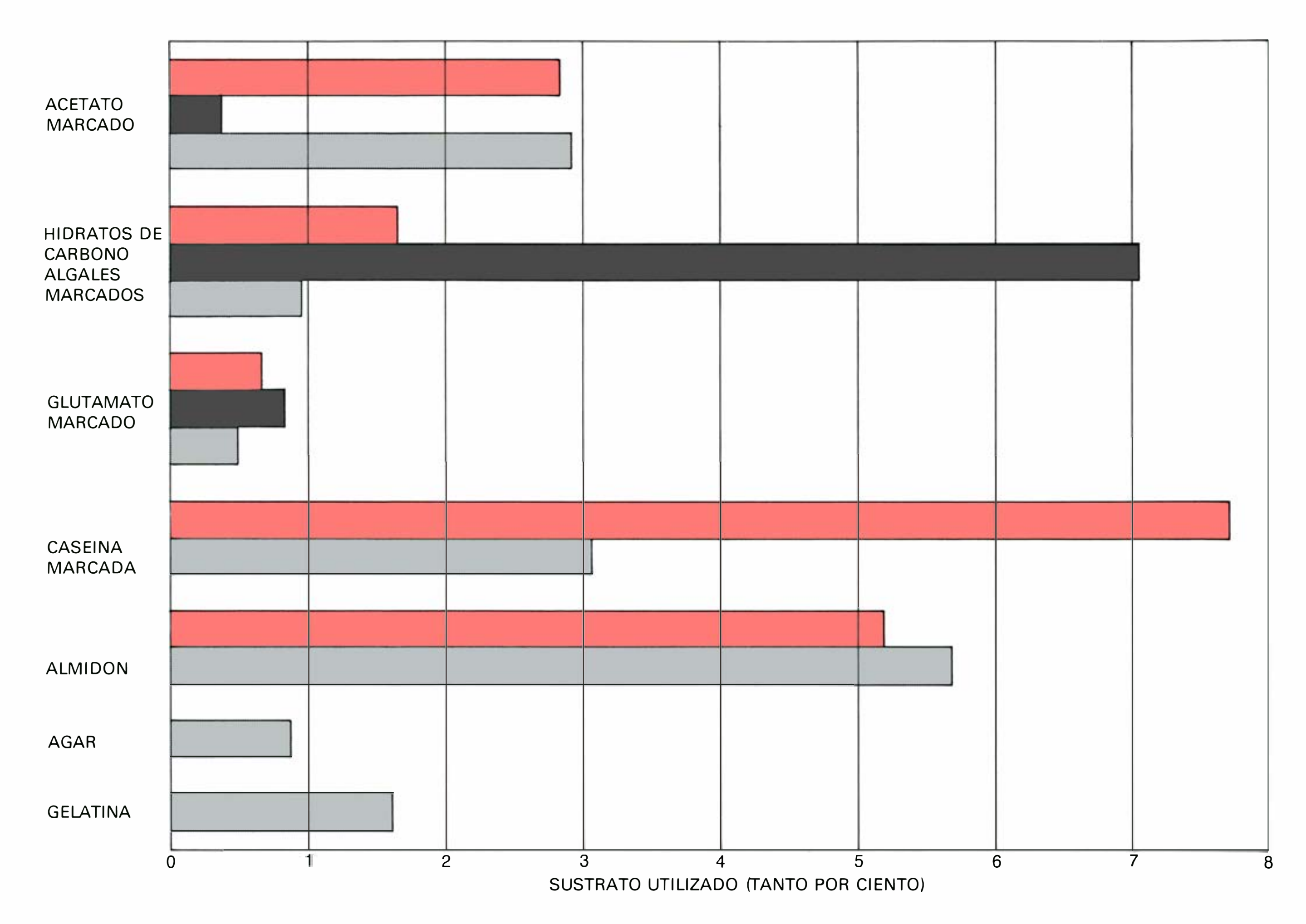
Algunos de los materiales más resistentes (la quitina, por ejemplo) sólo pueden metabolizarse con ayuda de enzimas bacterianos. Ello nos lleva a especular con la posibilidad de que el tubo digestivo de los animales bentónicos pueda constituir un nicho ecológico particularmente adecuado para las especies barotolerantes o barofílicas. J. A. Allen y Howard L. Sanders, también de Woods Hole, han descubierto que el intestino de los moluscos de los hábitats bentónicos posee un tamaño considerablemente mayor que el de sus congéneres de aguas someras. Esta observación apoya nuestra hipótesis de que el intestino constituye un nicho bacteriológico especial. Por este motivo durante varios años hemos sometido a prueba a los microorganismos procedentes del contenido estomacal de varios animales bentónicos, tanto en cultivos puros procedentes de una bacteria aislada como en poblaciones mixtas de bacterias, para intentar localizar cepas barofílicas. Sin embargo, las respuestas de estas bacterias venían a ser solamente distintos grados de barotolerancia. Las respuestas obtenidas en este sentido son semejantes a las halladas con las bacterias obtenidas de muestras tomadas del mar profundo y de los sedimentos del fondo.

Este resultado no debe sorprender, ya que gran parte de vida microbiana de los sedimentos profundos puede proceder de las bacterias intestinales de las especies ramoneadoras que viven en el fondo. Estos estudios no niegan por completo toda posibilidad de existencia de bacterias barofílicas. Para tener una respuesta definitiva debía aguardarse a los resultados obtenidos al trabajar con cultivos puros de bacterias que no han sufrido descompresión.

Sabíamos bien que los animales, al igual que las bacterias, contribuyen en grado importante a la descomposición de los restos orgánicos presentes en el fondo del mar, pero no estudiamos específicamente este hecho. Los recipientes de incubación empleados en nuestros experimentos excluían a todo organismo de más de 100 micras de diámetro. Pensamos por tanto que sería útil comparar las tasas de descomposición realizadas respectivamente por las bacterias y por organismos de mayor tamaño. Para este trabajo se empleó un aparato que consistía en un conjunto de tubos de plástico verticales. Cada tubo estaba dividido en cuatro compartimientos, que eran accesibles desde el exterior a través de un orificio circular. Llenamos los distintos compartimientos con diferentes nutrientes (por ejemplo, agar, gelatina y almidón), colocamos los tubos en bastidores y depositamos éstos en el fondo del océa-



LA ACTIVIDAD METABOLICA de una población microbiana natural no sometida a descompresión, obtenida a unos 3000 metros de profundidad *(en color)*, **se midió en el laboratorio a la presión correspondiente de unas 3000 atmósferas. La actividad de una población control** *(en negro)* **se midió a presión atmosférica normal. Ambas poblaciones se mantuvieron a la temperatura propia del mar profundo (3,5 °C) y se les suministró nutrientes marcados con carbono radiactivo. La respiración** *(línea a trazos)* **y la asimilación de carbono** *(línea continua)* **se expresan como porcentaje del nutriente utilizado. La población que se mantuvo a la presión existente en el fondo fue 64 veces más lenta en la asimilación del carbono y 11 veces más lenta en la respiración con respecto a la otra población microbiana que había permanecido expuesta a la presión atmosférica.**



LA INCUBACION *IN SITU* de recipientes provistos de nutrientes, inoculados con agua de mar y depositados en el fondo del océano durante un lapso de dos meses a un año, produjo el registro de actividad microbiana ilustrado en la figura. Siete substratos distintos, cuatro de ellos marcados con carbono radiactivo, fueron procesados de una o más de las siguientes formas: inoculación a 200 metros y a continuación incubación a 5300 metros *(barras coloreadas)*, inoculación a 200 metros seguida de una incubación a 1830 metros *(negras)* e inoculación a 1830 metros con incubación a la misma profundidad *(gris)*. En cada caso se tuvo como control una muestra igual de agua de mar a la que se agregó los mismos nutrientes, pero que se incubó en las condiciones del laboratorio, a presión normal y temperatura de tres grados centígrados. La actividad metabólica de las poblaciones naturales microbianas incubadas en el fondo se expresa como porcentaje de los nutrientes utilizados por la población control, a presión normal, durante el mismo espacio de tiempo. Las respuestas de las poblaciones a las distintas condiciones fueron muy variables, pero por término medio la actividad de las muestras incubadas *in situ* representa sólo el 2,8 por ciento de la actividad *in vitro*.

no. Con la ayuda de un deflector se situaba el bastidor de tal modo que los dos compartimientos inferiores quedadan enterrados en el sedimento del fondo, pero no los dos restantes.

Los bastidores de tubos se retiraron después de permanecer de 12 a 15 meses en nuestras estaciones en el fondo. Las superficies desnudas de los nutrientes habían sido colonizadas por bacterias, pero mostraban escasa descomposición bacteriana. Esto sucedía en especial con los nutrientes incubados en los compartimientos que habían sido enterrados en el sedimento. Sin embargo, en los casos en que el orificio de acceso había quedado al ras de la superficie del sedimento o que había permanecido por completo en contacto con el agua, su interior mostraba signos claros de la actividad de animales de mayor tamaño. Varios compartimientos habían sido invadidos por pequeños moluscos (específicamente bivalvos) y por anélidos marinos (poliquetos). A pesar de que estas pruebas eran sólo semicuantitativas, indicaban claramente que la actividad alimentaria de los animales bentónicos procedía con rapidez.

Este hecho ha sido demostrado también por investigadores pertenecientes a la Scripps Institution of Oceanography. John D. Isaacs ha demostrado, mediante las pruebas aportadas por fotografías tomadas a distintos tiempos, que los peces aparecen rápidamente después de la ubicación de un cebo y que lo consumen en días, quizás en horas. Hessler ha observado el mismo tipo de rápida respuesta por parte de los crustáceos que viven en las fosas oceánicas, en las que los peces parecían hallarse ausentes.

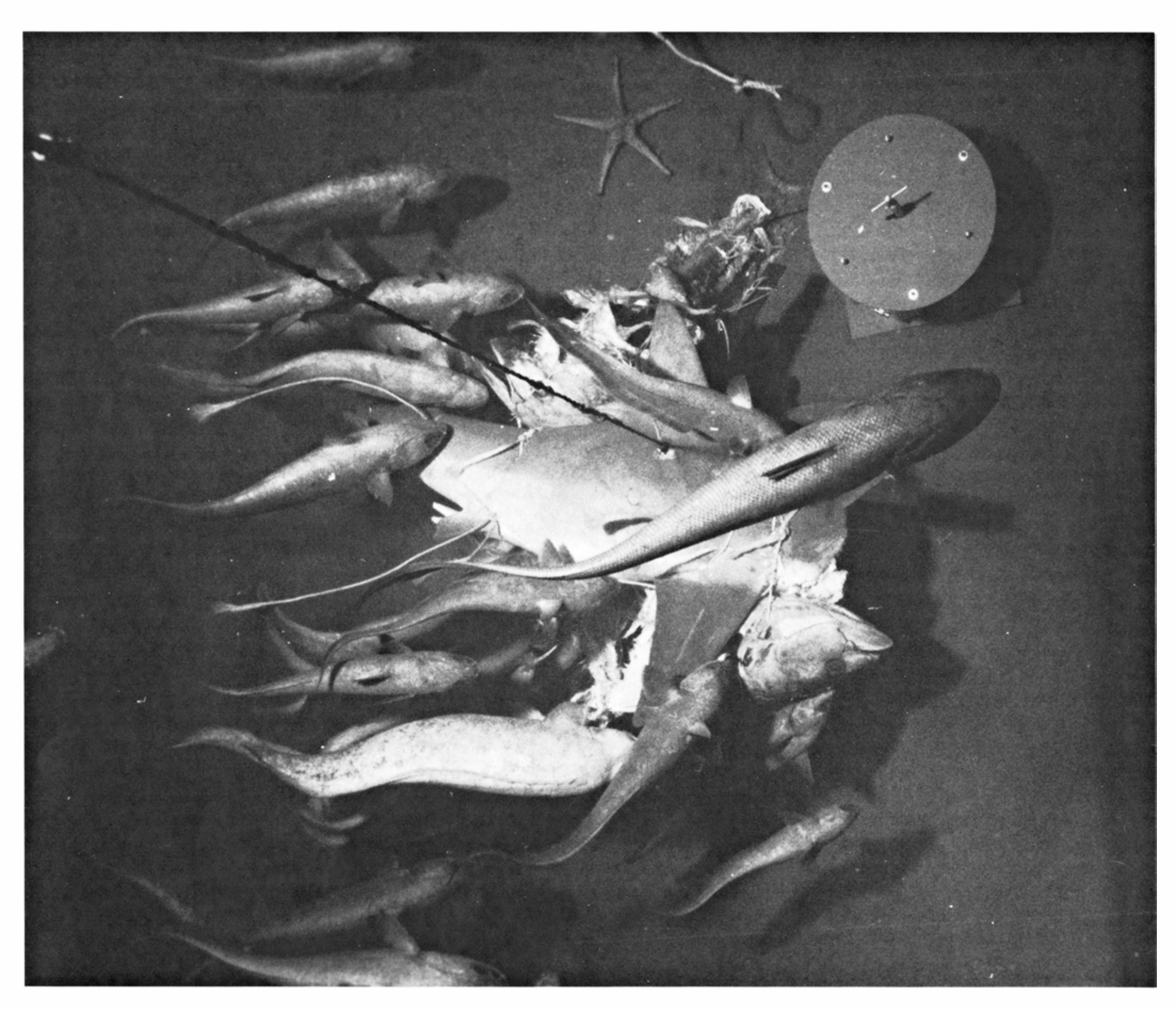
Sin embargo, comparar la alimentación animal con la utilización de nutrientes por parte de las bacterias supone confundir comportamiento con metabolismo. Las bacterias permiten medir directamente el efecto de las condiciones existentes en el fondo del mar sobre los procesos metabólicos. A diferencia incluso de los invertebrados más sencillos, las bacterias carecen de sistema nervioso y de modelos complejos de comportamiento. Además, no muestran variabilidad individual dentro de una población determinada. Estas propiedades hacen que las bacterias constituyan un material único para la realización de experimentos fisiológicos cuantitativos repetitivos.

Los estudios del metabolismo animal, como parte del comportamiento, son más difíciles de realizar y de interpretar. Algunos resultados preliminares sugieren que estos organismos no son totalmente inmunnes a los efectos de elevadas presiones. Kenneth L. Smith, de la Scripps Institution, mediante la captura de un pez de mar profundo en una nasa de plexiglás depositada sobre el fondo oceánico, logró determinar que su tasa de consumo de oxígeno en aguas profun-

das era menor en dos órdenes de magnitud a la tasa de un pez de aguas someras de tamaño parecido. Es posible que al ser encerrados en los recipientes los peces modificaran su tasa metabólica.

Sanders y J. Frederick Grassle, de Woods Hole, han estudiado la fauna bentónica durante muchos años y han obtenido una serie de conclusiones, a partir de criterios diversos, como por ejemplo el escaso número de huevos puestos y la longevidad aparente de animales aislados, que los procesos vitales en los niveles profundos del océano deben ser más lentos que los observados en aguas someras. Ello coincide con una observación realizada por Karl K. Turekian, de la Universidad de Yale, quien calculó la edad de un pequeño bivalvo bentónico mediante la relación de los isótopos presentes en su concha, y halló que tenía unos 100 años. Los parientes cercanos de este molusco, que habitan en aguas someras, raramente viven más de dos o tres años y nunca rebasan los diez. Por lo tanto, en general puede concluirse que los procesos vitales de los animales y de las bacterias pueden ser más lentos en el mar profundo que en las aguas superficiales.

Una interesante excepción respecto de este cuadro general es la observación realizada por Ruth D. Turner, de la Universidad de Harvard, acerca de los bivalvos horadadores de la madera, que dependen por completo de la madera como recurso ajeno al mar. Las tasas de desarrollo de estos bivalvos en el mar profundo son semejantes a las de los mismos animales en aguas someras. En lugar de seguir una estrategia para la supervivencia basada en el ahorro de energía y en la longevidad individual, parece que estos organismos consumen rápidamente sus recursos alimentarios con el fin de conseguir una máxima producción de crías con la puesta de una enorme cantidad de huevos. Para asegurar la supervivencia de la especie es preferible optar por una máxima puesta de huevos en lugar de la conservación de un recurso poco común. La dispersión de una enorme cantidad de huevos incrementa la probabilidad de que como mínimo algu-



ESTUDIOS DE DEGRADACION en el mar profundo, según se observan en la Woods Hole Bottom Station n.º 2, situada a una profundidad de 3640 metros, a unas 200 millas al sur de la isla de Nantucket. Una cámara automática toma fotografías a cada 30 minutos durante 17 días, después de depositar una carnada formada por dos atunes y un tiburón. Esta fotografía se realizó al cabo de quince días; los carroñeros han terminado con los atunes pero el tiburón permanece intacto. La mayoría de los peces aquí visibles son granaderos *(Coryphaenoides armatus)*. El ejemplar de mayor tamaño es un brotúlido *(Parabassogigas crassus)*. El objeto circular que se observa en el extremo derecho es la parte superior de la trampa que fue montada por los autores cuando visitaron la estación a bordo del *Alvin*. Está cebada con carne de pescado marcada radiactivamente y permite la entrada de pequeños animales tales como los anfípodos (crustáceos carroñeros). La recuperación de trampas de este tipo que hayan permanecido en el fondo permitirá estudiar el metabolismo de los anfípodos de las bacterias presentes en su intestino.

nos de los individuos de la nueva generación puedan toparse con un pedazo de madera e iniciar a su vez un ciclo vital que conducirá a la reproducción.

Por aplicación de un razonamiento análogo puede pensarse que el metabolismo barofílico de las bacterias supondría una adaptación evolutiva desfavorable en condiciones de escasez de recursos alimentarios. Sin embargo, este argumento no es válido en los casos en los que la supervivencia no se basa en la eficiencia del desarrollo y en la longevidad de las distintas células sino en la rápida producción de un elevado número de descendientes. Al comparar las bacterias con las capacidades de avituallamiento y recolección de alimentos por parte de los organismos altamente evolucionados parece que su única posibilidad de adaptación a las condiciones reinantes en los ambientes abisales consiste en la adquisición de barotolerancia y psicrotolerancia.

Existe muy poca información disponible acerca del modo en que la materia producida en las aguas superficiales llega al mar profundo y en qué cuantía. Las pequeñas partículas de materia orgánica se hunden tan lentamente que existen buenas razones para suponer que la mayor parte de su contenido fácilmente degradable es extraído antes de que lleguen hasta el fondo. Los alimentos menos descompuestos y por tanto más nutritivos que llegan al fondo del océano deben ser objetos de gran tamaño que se hunden rápidamente, como los despojos de peces. Son los animales, y no las bacterias, los principales carroñeros de estos restos, debido a la capacidad de los animales para localizar estos recursos alimentarios gracias al gran desarrollo de su sentido del olfato; son capaces de desplazarse rápidamente al lugar e ingerir el alimento. No obstante, sus deposiciones sirven para esparcir los restos de materia orgánica por todo el fondo marino, poniendo los nutrientes a disposición de los animales más pequeños e inmóviles y de los microorganismos que viven en los sedimentos del fondo oceánico.

Existe asimismo una lluvia continua de cagarrutas producidas por los organismos del zooplancton. Estos restos están envueltos por una película de barro cubierta de bacterias capaces de aprovechar los materiales que el zooplancton no puede digerir. En su largo viaje hacia el fondo, estas cagarrutas pueden ser ingeridas en más de una ocasión y en cada una de ellas son despojadas de sus bacterias, productoras de materiales digeribles. Actualmente se está estudiando, mediante recipientes adecuados en forma de trampas situadas en el fondo, la cantidad de materia orgánica de este tipo que llega efectivamente a las profundidades. Una función especialmente importante de las bacterias en la cadena alimentaria es la conversión de la materia orgánica disuelta en material celular bacteriano particulado, partículas cuyo tamaño óptimo permite que sean aprovechadas por los animales filtradores.

En todos estos casos, los vegetales, como productores primarios, constituyen el primer eslabón de la cadena alimentaria. Sin embargo, se observó una interesante excepción a esta regla durante una inmersión del *Alvin* en las proximidades de las islas Galápagos, en el Pacífico sudoriental. El submarino estaba explorando unas fuentes o vertientes situadas a una profundidad aproximada de 2700 metros en la fosa de las Galápagos. En las proximidades de las vertientes la tripulación observó una población excepcionalmente numerosa de grandes bivalvos y de otros animales filtradores. El agua presentaba un aspecto lechoso y las muestras que el *Alvin* transportó a superficie pusieron de manifiesto la existencia de concentraciones variables de oxígeno disuelto y de ácido sulfhídrico.

Las observaciones sugieren que en esas profundidades marinas se está produciendo un proceso bien conocido en las aguas someras: las bacterias obtienen la energía necesaria para sus procesos vitales del metabolismo no de materias orgánicas sino de sustancias inorgánicas. En presencia de oxígeno, las bacterias son capaces de oxidar el ácido sulfhídrico, reacción que desprende energía. El gran desarrollo que se produce de las poblaciones bacterianas, que en estas circunstancias actúan como productores primarios, promueve el crecimiento de grandes masas de organismos filtradores y otros situados en una posición superior en la cadena alimentaria. Esta especie de oasis con abundante vida situado en un hábitat bentónico se debe a que el producto primario no necesita hundirse desde la superficie hasta el sedimento del fondo sino que se produce *in situ* para el consumo local.

A pesar de que este fenómeno es muy peculiar y sorprendente, la mayor parte de los fondos oceánicos del mundo se parecen a los desiertos en lo referente a la abundancia de alimento. Está todavía por confirmar que la escasa vida abisal se mantiene del limitado abastecimiento de grandes pedazos de materias alimenticias que se hunden con rapidez.

Durante años hemos querido indagar más este aspecto usando de grandes cebos, como podría ser uno de los cetáceos que ocasionalmente quedan varados y mueren en las costas de Nueva Inglaterra. Si el cadáver varado es de grandes dimensiones, el servicio de guardacostas generalmente lo remolca hasta alta mar para eliminarlo, y confiamos en lograr que uno de estos restos sea llevado a las proximidades de una de nuestras estaciones profundas. En el ínterin hemos realizado el experimento en menor escala. Recientemente hundimos una buena muestra, consistente en dos atunes y un gran tiburón que fueron situados en las proximidades de la estación de fondo n.º 2 ubicada a unos 360 kilómetros al sur de Nantucket. En este punto del Atlántico existe una profundidad de 3640 metros. Se unió al conjunto una cámara recuperable, ideada por Harold E. Edgerton, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, la cual fue situada en el cable por encima de la carnada; la cámara tomó fotografías a intervalos de 30 minutos durante los 16 días siguientes.

Nueve días después de la colocación de la carnada visitamos la estación a bordo del *Alvin*. Los dos atunes estaban medio consumidos, pero el tiburón permanecía intocado. En las proximidades observamos numerosos ejemplares de un tipo de peces de profundidad conocidos con el nombre de granaderos (macrúridos), pero no estaban alimentándose activamente. Divisamos solamente unos crustáceos pequeños en el fondo: quizá los peces se hayan encargado de que su número fuese escaso. Un posterior examen de las fotografías puso de manifiesto que la visita del *Alvin* había perturbado a los animales que allí se alimentaban. La abundancia de la población de carroñeros atraídos por la carnada, su diversidad e incluso distintos aspectos de su comportamiento ya han podido registrarse en forma fotográfica *(véase la ilustración de la página opuesta)*. Dos de nuestros colegas de Woods Hole, Richard L. Haedrich y Gilbert T. Rowe, están dedicados a analizar este registro.

En las proximidades de la carnada depositamos una nasa que contenía peces marcados radiactivamente con el fin de poder capturar algunos de los crustáceos que habían sido atraídos por el cebo de gran tamaño. Si se lograba capturar algunos crustáceos y consumían el alimento marcado podíamos averiguar algo acerca de sus tasas metabólicas. En la misma inmersión iniciamos también un experimento acerca de los procesos de descomposición en los que intervienen

organismos de tamaño intermedio. El aparato es sencillo: un par de cajas de plexiglás, cada una de ellas dividida en cuatro compartimientos *(véase la ilustración inferior de la página 45).* Cada compartimiento contiene la misma variedad de alimentos sólidos; los compartimientos están cerrados por tamices de nylon de distinta trama cuyo poro varía entre 0,3 y 12 milímetros, gama de tamaños que permite el paso de una gran variedad de organismos. En esta inmersión de 11 horas hemos dispuesto lo necesario para 9 experimentos distintos.

Nuestros experimentos en el estudio de la actividad microbiana en el fondo del mar se iniciaron con la observación de la fiambrera que contenía el almuerzo de la tripulación del *Alvin,* continuaron con las incubaciones realizadas *in situ* en el fondo del mar y con las inoculaciones realizadas mediante la ayuda del *Alvin* y finalmente se produjo el desarrollo de equipos adecuados para mantener la presión y la temperatura originales y poder de este modo realizar trabajos de laboratorio más complejos. Todos los datos obtenidos con poblaciones naturales indicaron una disminución en las actividades metabólicas en las condiciones existentes en las regiones abisales del océano. Al comparar la actividad de las bacterias con las capacidades de localización y recolección de alimento mostradas por los organismos muy evolucionados, parece que su única posibilidad de adaptación a esas condiciones ambientales se basa en la adquisición de psicrotolerancia y barotolerancia. La próxima etapa lógica consistirá en la obtención de cultivos puros de bacterias que no hayan sufrido descompresión, ya que todavía es posible la existencia de bacterias barofílicas que escapen a nuestros actuales medios de detección. Los cultivos puros permitirán además el estudio del grado y la naturaleza de la barotolerancia. El trabajo sobre la base molecular de los efectos de la presión sobre los microorganismos se está realizando en el laboratorio de Joseph V. Landau y Daniel H. Pope en el Rensselaer Polytechnic Institute. Trabajos similares con cultivos de bacterias de mar profundo que no hayan sufrido descompresión habrán de revestir mayor interés.

Ahora, desde la perspectiva de estos años, nos damos cuenta de que si los bocadillos del *Alvin* no hubieran estado adecuadamente guardados en el interior de la caja, los peces y los crustáceos los hubieran comido y los microorganismos no hubieran tenido la menor oportunidad. Ni tampoco los microbiólogos.



GLOBULO DE BOK conocido por Barnard 335. Forma un aparente agujero en el cielo, en esta fotografía hecha por Bart J. Bok con el telescopio reflector de 2,20 metros del Observatorio Steward de la Universidad de Arizona. Tales objetos, que Bok fue el primero en reconocer como una clase, son nubes interestelares de gas y polvo, aisladas, compactas y geométricamente regulares. "Barnard" hace referencia a Eduard Emerson Barnard, quien, a principios de siglo, hizo una amplia prospección fotográfica de las nubes oscuras interestelares. Los glóbulos de Bok no son uniformemente opacos. Normalmente, se difuminan a partir de un núcleo denso, de modo que las estrellas pueden brillar a través de sus regiones más externas. Barnard 335 se encuentra a unos 1200 años-luz del sistema solar y tiene unos dos años-luz de diámetro.

Los glóbulos de Bok

Son nubes esféricas de polvo y gas interestelares que destacan sobre un fondo de estrellas o de gas luminoso. Los datos sugieren que están colapsando, y quizá sean estrellas en formación

Robert L. Dickman

La expresión "espacio interestelar" evoca un inmenso vacío. Efectivamente, las estrellas de nuestra galaxia están separadas por distancias que son casi imposibles de comprender a nivel de la experiencia cotidiana. En las proximidades del Sol, por ejemplo, la distancia media entre estrellas contiguas es de unos tres años-luz, o sea unos 28 billones de kilómetros. Además, el espacio entre las estrellas es un vacío que supera a todo lo que se ha logrado en la Tierra. Se trata, sin embargo, de un tipo granulado de vacío. Esparcidas entre las estrellas de nuestra galaxia hay nubes enormes, en su mayor parte no luminosas, de gas tenue, polvoriento. Aunque esas nubes forman menos del 10 por ciento de la masa total de la galaxia, son una componente dinámica e importante de ella, en no pequeña medida porque son la materia prima a partir de la cual se hacen nuevas estrellas. Estudiando la interacción de procesos físicos observada en las nubes interestelares, los astrónomos esperan comprender mejor la sucesión de acontecimientos que acaba originando las estrellas. En, un sentido más amplio, esperan esclarecer los mecanismos físicos básicos que rigen el comportamiento, composición y evolución del medio interestelar.

La presente exposición se centrará en un tipo de nubes interestelares conocidas por glóbulos de Bok. Estos objetos pueden definirse como nubes interestelares de polvo, compactas, bastante opacas, aisladas y de forma regular. Reciben su nombre de Bart J. Bok, el astrónomo holandés-estadounidense que, hace más de 30 años, llamó la atención sobre ellas como una clase definida de nubes interestelares y que sugirió su posible condición de precursores de estrellas. Aunque los datos recogidos hasta el presente tienden a confirmar lo correcto de la original y, en cierta medida, atrevida conjetura de Bok, en el curso de los últimos años se ha hecho evidente que los lugares más conspicuos de formación de estrellas no son los glóbulos, sino las masivas nubes moleculares asociadas a las nubes brillantes de gas ionizado difuso conocidas como regiones H_{II}. Por tanto, el interés astronómico por los glóbulos de Bok como emplazamientos de orígenes estelares ha decrecido algo. Sin embargo, se reconoce cada vez más que los glóbulos son una importante fuente de información acerca de los estados más condensados del medio interestelar.

Los glóbulos de Bok son las estructuras más pequeñas y regulares conocidas en el medio interestelar. La aparente ausencia de una fuente interna importante de energía, como podría ser un cúmulo recientemente formado de estrellas jóvenes calientes, limita en gran medida la variedad de procesos físicos que el astrofísico necesita tener en cuenta cuando intenta comprenderlos. Carentes de fuente interna de energía, los glóbulos de Bok se cuentan entre los objetos más fríos del espacio interestelar: la mayoría tienen una temperatura de sólo unos 10 grados Kelvin (10 grados Celsius por encima del cero absoluto). Por tanto, son elementos casi ideales para compararlos con modelos teóricos de nubes, esas representaciones muy simplificadas de los principios físicos esenciales de las nubes que los astrofísicos construyen para comprobar su comprensión de los procesos interestelares.

Empezaremos situando los glóbulos de Bok sobre el enorme telón de fondo de nuestra galaxia, conjunto de unos cien mil millones de estrellas que incluye al Sol como miembro de poca monta. Las fuerzas de autogravitación y de rotación han confinado el grueso de las estrellas de la galaxia en un disco espiral aplastado de, unos 100.000 años-luz de anchura. Exceptuando una protuberancia en el centro, el disco tiene un espesor de sólo 600 a 1200 años-luz. El sistema solar se encuentra en el disco galáctico, a unos dos tercios del camino a partir del centro, de modo que, desde dentro, percibimos el disco como la Vía Láctea, la banda luminosa visible en el cielo nocturno, producida por la luz de millones de estrellas demasiado débiles para ser resueltas a ojo, sin ayuda de instrumentos.

Puesto que el medio interestelar tiene masa, está sometido a las mismas fuerzas de gravedad y rotación que han dado forma a la galaxia. Por tanto, no es muy sorprendente que las nubes interestelares estén también, en gran parte, confinadas en el disco galáctico. Las nubes constan principalmente de hidrógeno, pero contienen también una pequeña cantidad de tenues partículas sólidas: el polvo interestelar. Esta traza de polvo relativamente insignificante, que representa menos del uno por ciento de la masa total de las nubes interestelares, atenúa y enrojece la luz de las estrellas que pasa a través de las nubes, de modo muy parecido a como el polvo de la atmósfera terrestre atenúa y enrojece la luz del sol poniente. Si la nube es lo bastante densa, bloqueará totalmente el paso de la luz estelar y creará lo que aparece como un agujero en medio de un abundante campo estelar.

La detección de nubes oscuras

Para que una nube interestelar oscura sea detectada por métodos ópticos deben satisfacerse normalmente tres condiciones. Primero, la nube debe contener, a lo largo de la visual, polvo suficiente como para que disminuya apreciablemente el número de estrellas que se ven a través de ella. Segundo, dado que la reducción en el número de estrellas que se ven a través de la nube puede juzgarse sólo en relación a la densidad del fondo de estrellas en regiones inmediatamente adyacentes, la nube debe estar en una parte donde el número de estrellas por uni-

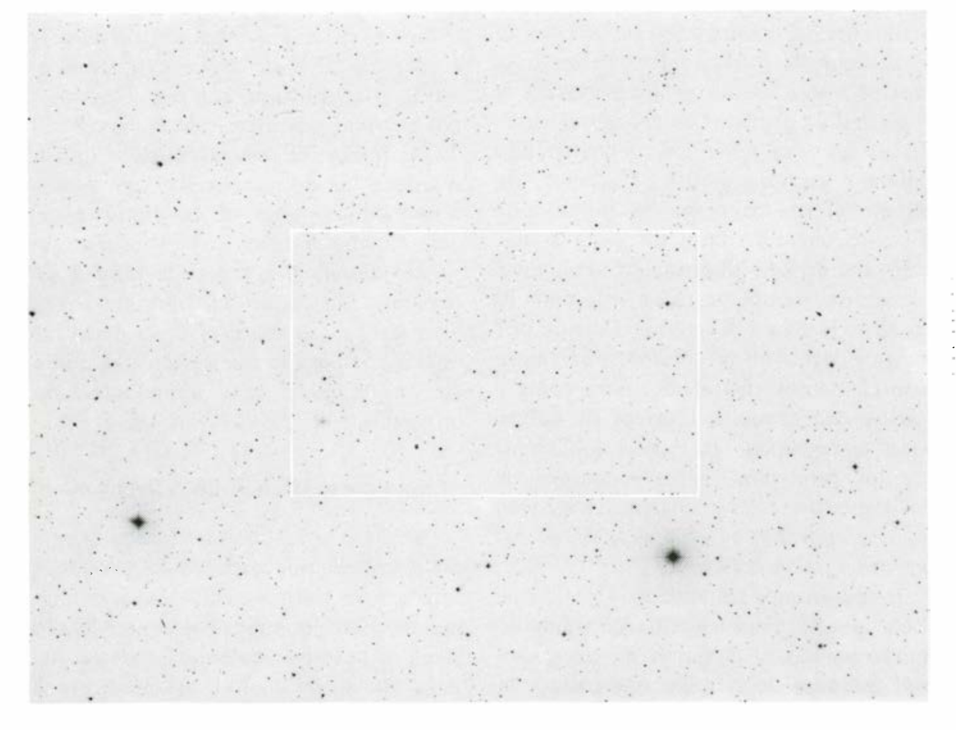
dad de área sea grande. En general, cuanto más pequeña y menos absorbente sea la nube que uno espera detectar, tanto más rico debe ser el fondo estelar para poder fiarse de que la disminución en el número de estrellas es producida por la absorción del polvo y no simplemente por una fluctuación estadística del fondo estelar. Tercero, la nube ha de estar bastante cerca del sistema solar (en la práctica, dentro de unos 3000 años-luz); en otro caso puede haber demasiadas estrellas situadas delante de la nube como para que su detección sea segura.

La detección y el estudio ópticos de pequeñas nubes oscuras interestelares requieren, por tanto, fotografías de larga exposición con grandes telescopios. Sólo este método es capaz de destacar el gran número de estrellas débiles necesarias para la detección. Esta restricción se aplica a la mayoría de las nubes oscuras interestelares, pero no a todas. Algunos complejos de gas y polvo interestelares son tan grandes y tan opacos que pueden verse fácilmente a ojo. Fueron, claro está, perceptibles para los astrónomos antiguos, aunque difícilmente pudieron haber apreciado su verdadera naturaleza. El complejo opaco más prominente para los que viven en el hemisferio norte es la Gran Grieta del Cisne, un complejo de nubes oscuras en forma de cadena que oscurece de modo más o menos continuo una banda estrecha de la Vía Láctea, cuando ésta pasa a través de las constelaciones del Cisne y del Aguila.

Aunque esos estados más densos y más oscuros de la materia interestelar fueron probablemente las primeras manifestaciones conocidas del medio interestelar, han tardado en ser sometidos a un examen científico detallado. A pesar de los rápidos avances en astronomía fotográfica que se hicieron a finales del siglo XIX y principios del XX, hubo durante muchos años un enérgico debate sobre la naturaleza de los "agujeros en el cielo" revelados gráficamente por la fotografía de larga exposición. Aunque algunos astrónomos aceptaron con facilidad la existencia de nubes oscurecedoras de materia interestelar, otros mantuvieron firmemente que los "agujeros" eran eso precisamente, espacios vacíos abiertos de algún modo en el fondo estelar. La intensidad que tenía el debate a principios de este siglo aparece de un modo muy vivo en los escritos del astrónomo estadounidense Edward Emerson Barnard. Barnard comparte con su contemporáneo alemán Maxmilian Wolf el principal honor en la fundación del estudio fotográfico de nubes interestelares oscuras como rama de la astronomía de observación. Aunque se convenció pronto de la realidad de las estructuras que había fotografiado y estudiado cuidadosamente, hay un trasfondo de cautela en sus muchas publicaciones sobre el tema. No se comprometió explícitamente (en letra impresa) sobre la realidad de sus "marcas oscuras" hasta 1919.

La noción de agujeros reales abiertos en el fondo estelar por fuerzas misteriosas fue dejándose de lado gradualmente a principios de este siglo, cuando quedó claro que los abruptos límites de muchas nubes oscuras serían borrados rápidamente por los movimientos fortuitos de las estrellas, si se tratara de espacios verdaderamente vacíos. Al mismo tiempo, el concepto de un medio interestelar extenso y polvoriento, en gran parte no luminoso, iba ganando rápidamente aceptación. La existencia de materia interestelar absorbente ya había sido sugerida en el siglo XIX por el astrónomo ruso Friedrich G. W. Struve. La idea fue decisivamente confirmada a finales de la década de 1920, por la labor del astrónomo estadounidense Robert J. Trumpler. La imagen resultante era la de una distribución ubicua y ampliamente difusa de materia oscurecedora en la galaxia que explicaba muchas cosas, incluyendo la atenuación y enrojecimiento progresivos de estrellas y cúmulos estelares con el aumento de la distancia a la Tierra y la aparente concentración de otras galaxias en regiones del cielo apartadas del plano de la galaxia (ya que la mayor parte del polvo está situado cerca del plano del disco galáctico). La caracterización de las nubes oscuras como objetos desacostumbradamente densos y bien localizados, sumidos en un medio interestelar más difuso, también iba quedando clara.

El gas frío interestelar tiene pocas "rúbricas" observables en la región óptica del espectro, pero ya a principios de este siglo se habían ido acumulando datos que sugerían que hay cantidades significativas de gas entremezcladas con el polvo interestelar. Se sabía que las nebulosas brillantes están compuestas de gases como hidrógeno, helio, carbono, oxígeno y nitrógeno. Se habían descubierto, además, rayas espectrales de absorción debidas a átomos de calcio y de sodio situadas a lo largo de la visual a ciertas estrellas lejanas. Por tanto, en la misma época en que Trumpler estableció la presencia de polvo interestelar, ya estaba firmemente aceptada la existencia de gas interestelar, aunque su relación exacta con el polvo, especialmente en las



LA DIFICULTAD DE IDENTIFICAR NUBES OSCURAS INTERESTELARES se demuestra en esta fotografía, reproducida a partir de una copia en negativo, de una región que está en la constelación de la Osa Mayor. Dado que la región está lejos del plano central de nuestra galaxia, la densidad de estrellas es baja. Beverly T. Lynds, del Observatorio Nacional de Kitt Peak, ha llamado la atención sobre la región pobre en estrellas de dentro del rectángulo blanco, y ha suscitado la cuestión de si la región representa una nube oscura o, simplemente, una fluctuación estadística del fondo estelar. Ha llegado a la conclusión de que la presencia de una nube es muy improbable, conclusión que se ve apoyada por la ausencia de emisión radiodetectable de moléculas de monóxido de carbono; dichas moléculas se hallan invariablemente asociadas con nubes de polvo y gas.



EL GLOBULO DE BOK DIFUSO Barnard 255 está dentro del rectángulo blanco de esta copia en negativo. Aunque la nube contiene menos polvo y gas que la mayoría de los glóbulos de Bok, aparece bastante claramente debido a que está en una región rica en estrellas. Si Barnard 255 estuviera en la región del cielo que se muestra en la ilustración de la página opuesta, sería casi imposible detectarlo visualmente. Podría serlo, sin embargo, por la débil emisión de radio del monóxido de carbono, siempre, claro está, que uno supiera de antemano dónde buscar. Esta fotografía también se hizo con el telescopio Schmidt de 1,17 metros y es propiedad de National Geographic-Palomar Observatory Sky Survey.

nubes oscuras, no se entendía bien. El estudio de la componente gaseosa del medio interestelar se desarrolló rápidamente a principios de la década de 1950, cuando fue factible construir receptores de radio sensibles, capaces de detectar la raya de emisión característica del hidrógeno atómico a 21 centímetros.

Esa raya espectral se produce cuando el eje de giro del único electrón del átomo de hidrógeno salta 180 grados con respecto al eje de giro del núcleo atómico (un protón) y emite un fotón con una longitud de onda de 21 centímetros. En 1945 H. C. van de Hulst, de la Universidad de Leiden, había predicho que, siendo el hidrógeno el elemento más abundante del universo, con radiotelescopios equipados con receptores sensibles podría observarse una emisión generalizada a 21 centímetros. Su hipótesis se vio definitivamente confirmada seis años más tarde, cuando Harold I. Ewen y Edward M. Purcell, de la Universidad de Harvard, detectaron por primera vez la emisión interestelar del hidrógeno atómico.

El enfoque molecular

Con este profundo descubrimiento, las investigaciones de los dos componentes del medio interestelar, el gas y el polvo, empezaron a fundirse rápidamente. En 1955, A. E. Lilley, de Harvard, presentó un estudio definitivo de la relación cuantitativa entre ambas componentes. Explorando áreas amplias y relativamente difusas de oscurecimiento por polvo (en general se excluían las nubes muy oscuras), demostró que, a lo largo de cualquier visual dentro de la galaxia, la proporción de abundancia del hidrógeno atómico y del polvo era notablemente constante. Sin embargo, fue sorprendente que cuando se trataba de aprovechar la raya de 21 centímetros como sonda de las partes más oscuras del medio interestelar, se podía detectar muy poco hidrógeno atómico.

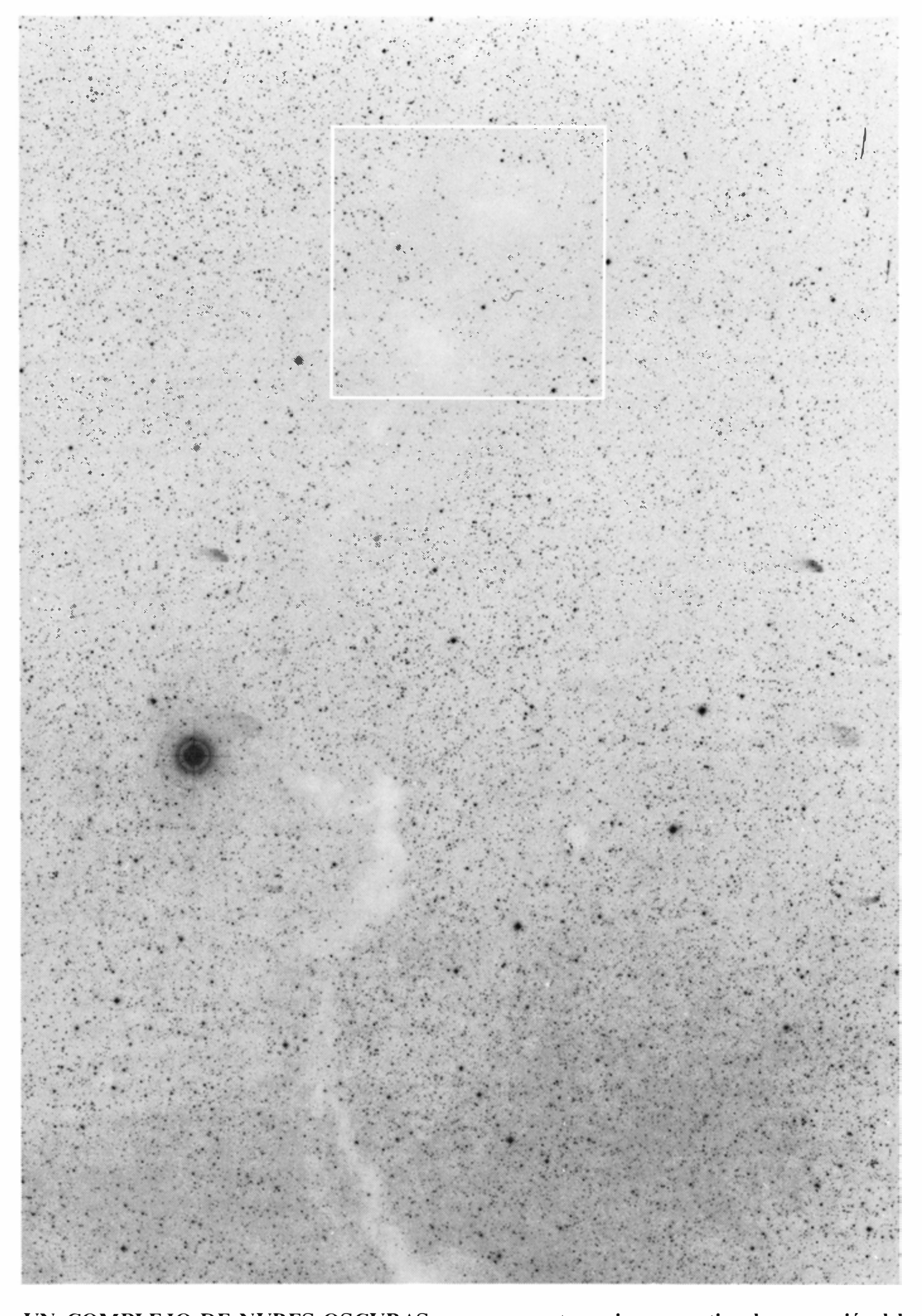
Se pudieron hacer evaluaciones precisas de la cantidad de polvo contenido en las nubes oscuras, en parte como resultado de refinamientos en las técnicas estadísticas de recuento de estrellas, técnicas puestas a punto por Bok en la década de 1930. Si la "ley de Lilley" regía para las nubes oscuras, incluso receptores de radio de sensibilidad modesta deberían haber detectado fácilmente el hidrógeno acompañante. No obstante, empezando por un estudio hecho por Bok y sus colaboradores de Harvard en 1955, se comprobó que la correlación de abundancia entre polvo e hidrógeno atómico, o bien fallaba o bien era ligeramente negativa. Por tanto, la perspectiva de poder sondear directamente el interior de las nebulosas oscuras parecía desvanecerse.

¿Cómo podía explicarse el fallo de la correlación? La respuesta, que no surgió completamente sino hasta el final de la década de 1960, es que el hidrógeno está ahí, pero más en forma molecular que en forma atómica. La molécula de hidrógeno, H_2, no tiene ninguna rúbrica espectral prominente y análoga a la raya de 21 centímetros, que es capaz de penetrar a través de la atmósfera de la Tierra. Por ello, ha sido casi imposible comprobar su presencia o ausencia. Además, pronto se estableció que en cualquier nube oscura de opacidad algo más que modesta los átomos de hidrógeno deben condensarse rápidamente en móleculas.

Las causas son, esencialmente, dos. Una guarda relación con el hecho de que, dejada sin protección en el espacio interestelar, una molécula de hidrógeno se disocia rápidamente en dos átomos por efecto de la radiación ultravioleta que impregna la galaxia. En cambio, el polvo existente dentro de una nube oscura tiende a hacer de pantalla para la radiación disruptora. Y lo que es aún más importante, el propio hidrógeno mole-

cular es muy opaco a la radiación ultravioleta. Por tanto, cuando se forma una pequeña cantidad de él en una nube oscura, el interior de ésta queda bien protegido contra los fotones ultravioleta. El otro motivo es que el polvo mismo promueve la formación de moléculas de hidrógeno. Estas no se forman por simple colisión de dos átomos de hidrógeno. Se necesita un tercer cuerpo, por ejemplo un grano de polvo, como lugar de formación. Los átomos de hidrógeno, en ocasiones, se pegan a los granos de polvo después de la colisión y son capaces de desplazarse por la superficie del grano. Cuando dos átomos de los que están sobre la superficie se juntan, liberan energía que es absorbida por el grano. La molécula de hidrógeno así creada puede ser eyectada de la superficie del grano por evaporación térmica.

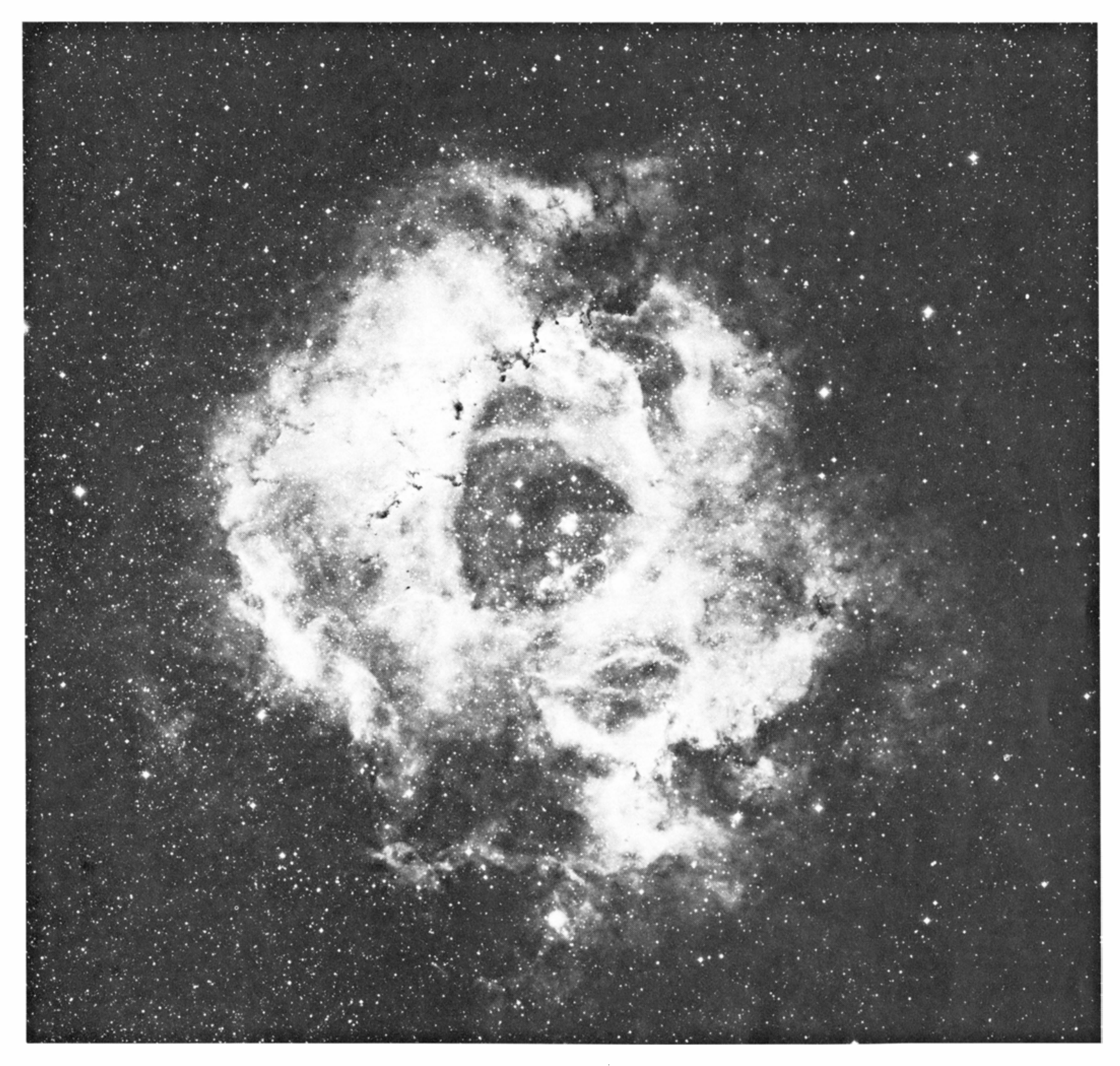
Si prácticamente todo el hidrógeno de las nubes más oscuras está en forma molecular, ¿cómo pueden investigarse las condiciones del interior de tales nubes? Además, puesto que con técnicas ópticas sólo es posible identificar las nubes oscuras próximas ¿cómo puede estudiarse la distribución de nubes oscuras en el conjunto de la galaxia? Hay una solución a estos problemas. Las nubes oscuras contienen trazas de otras moléculas, aparte del H_2, que forman rayas espectrales detectables con los modernos receptores radiotelescópicos. La nueva especialidad de la astrofísica molecular ha suministrado la clave que se necesitaba para abrir el interior de las nubes oscuras y revelar también su distribución en gran escala.



UN COMPLEJO DE NUBES OSCURAS aparece en esta copia en negativo de una región del Escorpión. Aunque la fotografía se tomó en la parte roja del espectro, que favorece al máximo la penetración del polvo, las estructuras de la nube aparecen claramente. Los dos glóbulos de dentro del rectángulo parecen haber sido desgajados de la nube de polvo alargada. Esta fotografía se hizo con el Schmidt de 1,17 metros y es propiedad de National Geographic-Palomar Observatory Sky Survey.

Está muy claro ahora que las mismas condiciones que dan lugar a la conversión de los átomos de hidrógeno en moléculas favorecen también la formación de otras moléculas: monóxido de carbono (CO), formaldehído (H_2CO), monosulfuro de carbono (CS), ácido cianhídrico (HCN), y especies moleculares considerablemente más complejas. Hasta ahora se han detectado más de 30 moléculas diferentes en las partes más densas del medio interestelar. La mayoría de ellas están confinadas en nubes de densidad extraordinariamente alta y no se observan en los glóbulos de Bok. El monóxido de carbono, la molécula más corriente después del H_2, es menos abundante que éste por un factor de cerca de 10.000. Pese a la gran escasez de monóxido de carbono y de otras moléculas menos abundantes, sirven bien como las radiosondas necesarias para el estudio sistemático de las nubes oscuras.

Esta es, pues, la imagen del medio interestelar, tal como hoy lo percibimos. Una pequeña fracción del medio existe en forma de gas tenue, luminoso y en gran medida ionizado: son las regiones H_{II}, producidas por la proximidad del gas a estrellas calientes jóvenes que emiten abundante radiación ultravioleta. El resto del medio interestelar está dividido, casi por igual, entre nubes en las cuales el gas es en su mayor parte hidrógeno atómico no ionizado, y nubes más densas, más opacas, en las que el gas es, principalmente, hidrógeno molecular. Las nubes más opacas pueden dividirse en dos tipos, convenientes pero algo arbitrarios, equívocamente denominados nubes moleculares y nubes oscuras. Ambos tipos de nubes son densos y oscuros, pero las nubes moleculares se distinguen por su gran tamaño (algunas tienen una anchura de decenas de años-luz), alta densidad central y gran masa (algunas tienen una masa muchos miles de veces mayor que la del Sol). Las nubes moleculares están casi siempre asociadas con regiones H_{II}, y reciben su nombre del rico muestrario de especies moleculares que puede detectarse en ellas. Las nubes oscuras son, por lo general, menores, menos densas, menos masivas, y corrientemente no están asociadas con nebulo-



MINUSCULOS GLOBULOS DE BOK, que parecen puntitos negros, se recortan nítidamente sobre el fondo brillante de la Nebulosa Roseta, en esta fotografía tomada con el telescopio de 5 metros de Monte Palomar. Debido a que los frágiles glóbulos parecen estar asociados con el gas caliente y ionizado de la nebulosa, puede que no sean comparables con los glóbulos de Bok mayores, y se hallen en proceso de disrupción.

sas brillantes de emisión. Las nubes oscuras presentan, en general, una amplia variedad de formas: de cadena, en encaje, dentadas, etc. Los glóbulos de Bok se sitúan dentro de este diversificado grupo de objetos.

Definición de un glóbulo

¿Qué es lo que justifica el singularizar los glóbulos de Bok como clase definida de nubes oscuras? Cuando Bok y E. F. Reilly señalaron por primera vez los glóbulos en 1947, estaban buscando nubes que pudieran identificarse como estadios primitivos de la formación de estrellas. Sus pesquisas estaban guiadas por dos criterios principales. Primero, buscaban regiones de gran opacidad óptica, producida por la concentración de polvo y gas en un volumen bastante pequeño. Segundo, buscaban regiones que fueran en apariencia lo bastante redondeadas como para sugerir que las fuerzas de la autogravitación habían empezado a actuar, como preludio al colapso de la nube y a la formación final de estrellas.

Bok y Reilly identificaron dos tipos de nubes interestelares oscuras que parecían satisfacer los dos criterios. El primer grupo, el más fácilmente estudiado, consistía en lo que se ha llamado a veces glóbulos de Bok mayores. Son nubes oscuras muy opacas, redondeadas, muchos ejemplos de las cuales pueden verse en el clásico atlas fotográfico de "marcas oscuras", de Barnard. El segundo grupo, del cual se sabe poco todavía (en parte debido a que las nubes son demasiado pequeñas como para ser estudiadas de modo eficaz con los radiotelescopios actuales), consiste en condensaciones minúsculas, extremadamente opacas, que se ven, proyectadas, frente a algunas regiones H_{II}. Su relación con sus contrapartidas mayores permanece oscura, pero parece ya claro que los dos tipos de objetos difieren en algo más que en el solo tamaño.

El simple hecho de que los glóbulos pequeños se vean en proyección frente a

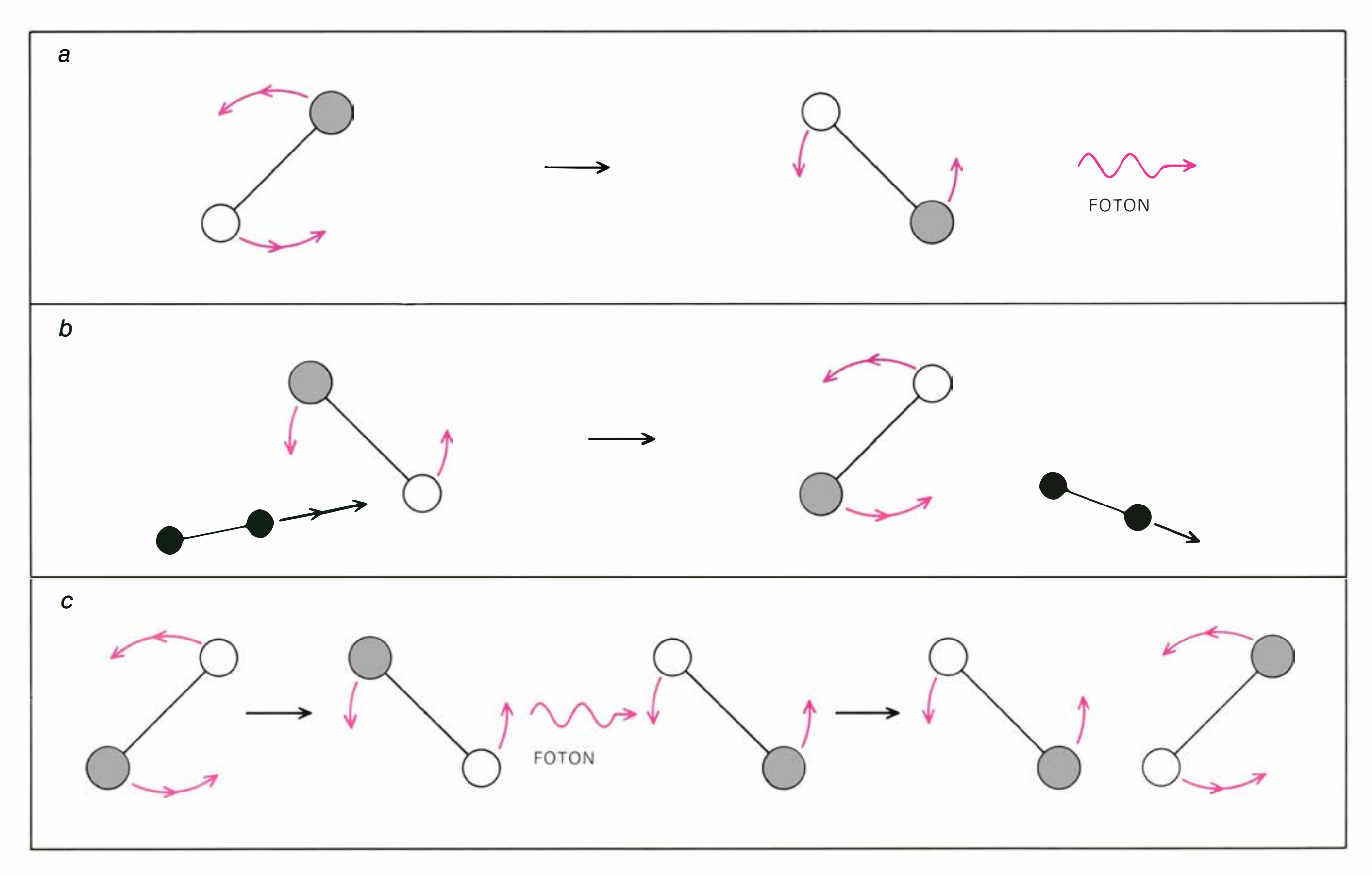
regiones H_{II} no demuestra que ambos estén asociados físicamente; lo único que puede afirmarse con seguridad es que los glóbulos están en alguna parte entre las regiones H_{II} y nuestros telescopios. Sin embargo, persiste la hipótesis de que esas pequeñas nubes de gas y polvo, cuya anchura es a menudo de sólo unas décimas de año-luz, están realmente cerca de las regiones ionizadas que se ven detrás. Recientemente, George H. Herbig, de la Universidad de California en Santa Cruz, ha señalado que los pequeños glóbulos no son, en realidad, muy esféricos. Fotografías de alta resolución revelan que las nubes tienen a menudo un alargamiento notorio y sistemático, lo cual sugiere vivamente que están siendo distorsionadas y rotas por las calientes regiones H_{II} en las que están aparentemente inmersas.

En cuanto a los glóbulos de Bok mayores, no se puede ser dogmático al describirlos como una clase diferenciada de nubes oscuras. La forma es necesariamente un criterio difuso cuando se aplica al medio interestelar, y no puede decirse que ninguna nube interestelar se vea perfectamente redonda. Además, muchas estructuras que a primera vista, sobre una placa fotográfica, parecen muy simétricas, muestran a menudo una importante asimetría circular cuando se hace un estudio cuantitativo detallado de la distribución del polvo. No obstante, mantener los glóbulos de Bok como una categoría diferenciada de nubes interestelares sigue siendo muy útil si se entiende que los glóbulos abarcan en un sentido amplio todas las nubes oscuras aisladas, compactas, que presentan un mínimo de regularidad geométrica. Tales nubes pueden considerarse como estructuras unitarias del medio interestelar.

Colapso gravitatorio

¿Por dónde debe uno comenzar para valorar la conjetura de Bok, de que los glóbulos son objetos gravitatoriamente inestables que acabarán contrayéndose para formar una o más estrellas? Dada la actual ausencia de datos sólidos de observación que prueben que efectivamente están naciendo estrellas dentro de los glóbulos, uno debe proceder evaluando los requisitos físicos para el colapso. Al principio, tales requisitos parecen conceptualmente simples. Supongamos que se conoce la masa, el radio y la temperatura interna de un glóbulo el cual, en primera aproximación, puede suponerse perfectamente uniforme y esférico. En esta imagen, la autogravitación de la nube, que tiende a comprimirla, depende sólo de la masa y del radio de la nube. La tendencia al colapso es resistida por la presión interna del gas de la nube, presión producida por la temperatura interna, no nula, del glóbulo.

Supongamos ahora que imaginamos que la masa y la temperatura de la nube son fijas y consideremos una sucesión de posibles valores para el medio de la nube. Es claro que cuanto mayor sea el radio más débil será la atracción gravitatoria que los constituyentes de la nube ejercen unos sobre otros: la fuerza de la gravedad entre dos masas decrece en proporción inversa al cuadrado de su separación. En todo caso, cuando el radio del glóbulo se hace más pequeño, se alcanza un valor crítico, por debajo del cual la atracción gravitatoria vence



LAS COLISIONES Y EMISIONES MOLECULARES efectúan la excitación del monóxido de carbono en los glóbulos de Bok y en otras nubes oscuras. Las moléculas de monóxido de carbono, representadas por esferas grises y blancas, tienen momentos angulares, o energías de rotación *(flechas curvadas)*, que varían por escalones cuánticos. Cuando la molécula cae de un estado de rotación al siguiente, la diferencia de energías aparece en forma de un fotón. Una molécula de monóxido de carbono puede volver a ganar energía por colisión con una molécula de hidrógeno *(dos esferas negras)*, la cual pierde energía de traslación *(b)*. En algunos casos *(c)*, el fotón emitido por un monóxido de carbono es reabsorbido por otro monóxido de carbono antes de que el fotón pueda salir de la nube. Este proceso recibe el nombre de confinamiento radiativo.

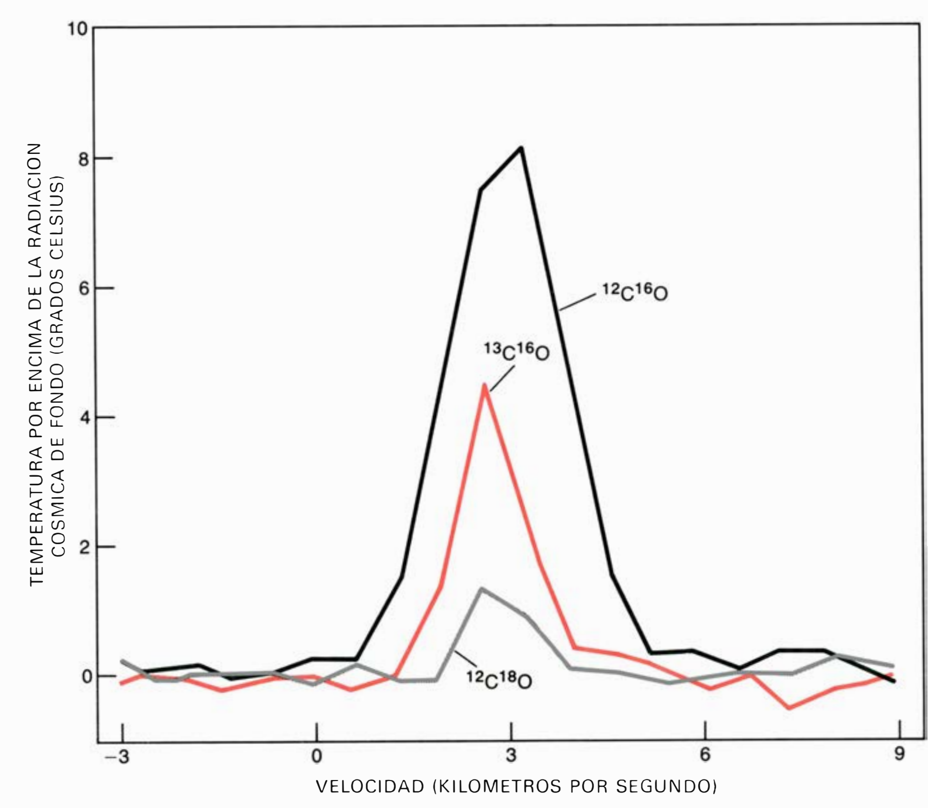
a la presión y el movimiento interno predominante de la nube es el colapso.

La aplicación de este sencillo esquema a un glóbulo de Bok real requiere, por tanto, conocer tres características de la nube: su radio, su masa y su temperatura. Si se conocen, uno puede calcular fácilmente si el radio del glóbulo está o no por debajo del valor crítico que se necesita para el colapso. Se puede determinar el radio de un glóbulo midiendo su tamaño aparente en las placas fotográficas y calculando entonces el verdadero radio a partir de cálculos respecto de la distancia de la nube. Pero los cálculos sobre la distancia de nubes oscuras suelen ser inciertos por un factor del orden de dos, lo cual implica la correspondiente incertidumbre en los valores calculados de sus radios.

También la masa puede obtenerse a partir de placas fotográficas, de nuevo con un correspondiente margen de incertidumbre. El método típico es utilizar las estadísticas de recuentos estelares para calcular la cantidad de oscurecimiento producido por el polvo de la nube. Mediante esto se logra un cálculo estimativo de la masa total de polvo. Se puede entonces estimar la masa de hidrógeno presente en la nube por medio de la proporción hidrógeno/polvo de Lilley. Como hemos mencionado, parece que la proporción se rompe a las enormes densidades que existen en el interior de las nubes moleculares masivas. No obstante, para las densidades de gas y polvo típicas de los glóbulos de Bok, la proporción de Lilley parece razonablemente segura. En todo caso, la masa obtenida de esta manera será normalmente un límite inferior, ya que muchos glóbulos tienen un núcleo totalmente opaco, a cuyo contenido de polvo sólo puede asignársele un valor mínimo. Así pues, dentro de límites razonables, se pueden obtener los radios y las masas mínimas de los glóbulos.

El problema siguiente es evaluar la temperatura interna de la nube. Es aquí donde el valor de la radioastronomía de rayas moleculares se hace evidente. Aunque hay varios métodos prácticamente independientes de empleo de las observaciones moleculares para determinar la temperatura del gas de dentro de una nube oscura, tal vez el procedimiento más potente sea aquel en que se hacen observaciones de la molécula de monóxido de carbono.

Como hemos visto, entre los elementos escasísimos en el medio interestelar, el monóxido de carbono es la molécula más difundida. Su raya espectral a una longitud de onda de 2,6 milímetros se



LA EMISION A PARTIR DE FORMAS ISOTOPAS del monóxido da carbono de claves sobre la densidad y movimientos del gas en una nube interestelar. Las curvas muestran la intensidad de las rayas espectrales provenientes de una zona del glóbulo de Bok Lynds 134. La intensidad viene expresada en grados Celsius por encima de la temperatura absoluta de la radiación cósmica de fondo, que es de unos tres grados Kelvin. La emisión más intensa es a partir de la forma más abundante del monóxido de carbono, $^{12}C\,^{16}O$, que consiste en carbono de peso atómico 12 y en oxígeno de peso atómico 16. La emisión que la sigue en intensidad es a partir del monóxido de carbono que contiene carbono 13, $^{13}C\,^{16}O$. ¡La emisión más débil es la de la forma que contiene oxígeno 18, $^{12}C\,^{18}O$. Los espectros permiten calcular el número aproximado de moléculas de cada tipo que hay a lo largo de la visual. La anchura de las rayas espectrales indica la distribución de velocidades de las moléculas. Valores positivos indican que el gas se está alejando del espectador. Los espectros fueron obtenidos por W. L. H. Shuter, W. H. McCutcheon y M. J. Mahoney de la Universidad de Columbia Británica, con el radiotelescopio de 4,6 metros perteneciente a la Aerospace Corporation.

hace fácilmente observable en más o menos las mismas condiciones que favorecen la conversión del hidrógeno atómico en hidrógeno molecular. Los procesos que suscitan la emisión de la raya del monóxido de carbono son muy sencillos y rigen por igual para muchas otras moléculas importantes desde el punto de vista astrofísico. La molécula de monóxido de carbono puede visualizarse como una estructura en forma de pesa de gimnasia, con un átomo de carbono en un extremo y un átomo de oxígeno en el otro. Es capaz de girar en torno a su centro de masas. Las velocidades de rotación de la molécula no son, sin embargo, arbitrarias. Los principios de la mecánica cuántica disponen que sólo están permitidos ciertos valores discretos del momento angular de rotación. Cuanto mayor sea el momento angular de la molécula, tanto mayor será la energía de rotación.

Una molécula aislada de monóxido de carbono, en cualquier estado de rotación que no sea el fundamental (el estado de no rotación), disminuirá de forma abrupta y espontánea su momento angular en una sucesión de cuantos, o unidades discretas, hasta alcanzar el estado fundamental. Con cada peldaño de la transmisión entre niveles de energía adyacentes, la molécula emite un fotón cuya longitud de onda es inversamente proporcional a su energía, descargando con ello el cuanto de energía que separa los dos estados de rotación. Para la radioastronomía actual, la transición más importante en el monóxido de carbono es la que conecta el primer estado permitido de rotación con el fundamental, lo cual se produce con la emisión de un fotón cuya longitud de onda es 2,6 milímetros.

En todos los estados, excepto en el fundamental, las moléculas emiten rápidamente fotones y decaen al fundamental. ¿Cómo es, pues, posible que las nubes interestelares emitan fotones de 2,6 milímetros y de otras rayas espectrales indefinidamente? La principal explicación es que las colisiones térmicas, entre las abundantes moléculas de hidro-

geno y las de las especies químicas de traza, mantienen continuamente cierta fracción de monóxido de carbono y de otras moléculas en estados de energía elevados. Además, antes de que algunos de los fotones emitidos por el monóxido de carbono y por moléculas aún más escasas puedan escaparse de la nube, son a menudo reabsorbidos por moléculas de las especies emisoras que se encuentran entonces en estados de energía más bajos. Este proceso, conocido por confinamiento radiativo, puede ayudar a mantener estacionaria una población significativa de moléculas excitadas. En último término, se puede llegar a un equilibrio entre todos los procesos de excitación y de caída radiativa que mantenga una distribución estacionaria de las diversas especies moleculares a diferentes niveles de energía. Si se alcanza un estado estacionario de este tipo, se dice que la excitación molecular está termalizada y refleja adecuadamente la temperatura del hidrógeno molecular de la nube.

Sondeo de un glóbulo

Supongamos, entonces, que uno observa una determinada transición molecular, como la raya de 2,6 milímetros del monóxido de carbono, que procede de dos niveles de rotación cuyas poblaciones estacionarias están termalizadas. En este caso, se puede determinar la temperatura máxima del gas dentro de la nube emisora, partiendo directamente de la intensidad de la raya espectral, siempre que, a lo largo de la visual, haya suficientes moléculas que contribuyan a la emisión observada. Para que se cumpla esta condición, la raya espectral que observamos debe ser "ópticamente gruesa". Resulta que la raya de 2,6 milímetros del monóxido de carbono de las nubes oscuras proviene de dos niveles de rotación de la molécula cuyas poblaciones suelen estar termalizadas, o casi lo están, en parte debido a que la abundancia relativamente grande del monóxido de carbono permite que el confinamiento radiativo contribuya grandemente a la excitación de la molécula. Además, existe una sencilla prueba para determinar si una raya dada del monóxido de carbono es ópticamente gruesa o no.

La combinación de isótopos más común en el monóxido de carbono de las nubes interestelares es una en la que el núcleo de carbono consta de seis protones y seis neutrones (carbono 12) y el núcleo de oxígeno consta de ocho protones y ocho neutrones (oxígeno 16). Esta forma de la molécula se denota $^{12}C^{16}O$. También están presentes, aunque en menor abundancia, por un factor de al menos 50, las moléculas con un núcleo de carbono 13: $^{13}C^{16}O$. Debido a la mayor masa del $^{13}C^{16}O$, las energías de sus estados de rotación son aproximadamente un 5 por ciento menores que las correspondientes del $^{12}C^{16}O$. Así pues, si un radioastrónomo quiere determinar si una raya espectral dada de $^{12}C^{16}O$ es ópticamente gruesa o no, sólo necesita sintonizar de nuevo un receptor a una frecuencia ligeramente más baja e intentar detectar una raya correspondiente de $^{13}C^{16}O$ desde el mismo lugar de la nube. Si se encuentra fuerte emisión de las especies isotópicas más escasas, es seguro que la raya del $^{12}C^{16}O$ es ópticamente gruesa y que es un índice válido de la temperatura de la nube.

He utilizado recientemente este método para investigar una muestra de ocho glóbulos de Bok. Su masa fluctúa desde unas 19 hasta más de 740 veces la masa del Sol, y su radio, desde aproximadamente un año-luz hasta 3,8 años-luz. Exceptuando a Barnard 5, todos tienen una temperatura de unos 10 grados K, la cual es típica de las nubes interestelares oscuras. ¿Puede sacarse alguna conclusión acerca de su estabilidad gravitatoria? Si se comparan simplemente los radios observados de los glóbulos con los radios críticos calculados, por debajo de los cuales, para una temperatura y una masa dadas, deberían colapsar, se encuentra que los ocho tienen radios claramente por debajo del valor crítico. Así pues, si el radio, la masa y la temperatura fueran los únicos parámetros que rigiesen, se debería concluir que esos ocho glóbulos de Bok están todos ellos en un vigoroso estado de colapso.

Sin embargo, los asuntos deben indagarse un poco más profundamente. Hemos supuesto implícitamente que la única fuerza capaz de oponerse a la autogravitación en las nubes es la presión térmica. Por tanto, hemos ignorado al menos tres agentes retardadores adicionales: la rotación, los campos magnéticos y la turbulencia hidrodinámica. Cada uno de ellos por separado, o dos o más en combinación, pueden evitar el colapso de una nube, aunque el radio observado de ésta sea mucho menor que el que hemos venido llamando el valor crítico.

Consideremos primero el posible efecto de la rotación para evitar el colapso de un glóbulo. Es claro que si una nube está girando en torno a su centro de masas, las fuerzas centrífugas pueden retrasar o incluso suprimir por completo una mayor condensación. Sin embargo, entre otras cosas, la geometría observada de los glóbulos sugiere que no hay veloci-

NOMBRE DEL GLOBULO DE BOK	RADIO APROXIMADO (AÑOS-LUZ)	MASA MINIMA APROXIMADA (MASAS SOLARES)	TEMPERATURA APROXIMADA (GRADOS KELVIN)	RADIO CRITICO APROXIMADO (AÑOS-LUZ)	VELOCIDAD CRITICA DE ROTACION APROXIMADA (KM/SEG.)
BARNARD 5	3.8	740	17	212	5.7
BARNARD 92	1.0	24	9	13	2.0
BARNARD 133	1.9	60	10	29	2.3
BARNARD 134	1.6	19	9	10	1.4
BARNARD 335	1.0	23	9	12	2.0
BARNARD 362	1.3	33	11	15	2.1
LYNDS 134	2.1	66	13	25	1.6
LYNDS 1262	1.6	63	11	15	2.6

LA MUESTRA DE OCHO GLOBULOS DE BOK investigada por el autor presenta una variación considerable en tamaño y masa, pero sólo una pequeña variación en temperatura. El radio crítico es aquél por debajo del cual un glóbo esférico de la masa indicada debe colapsar por autogravitación, si la única fuerza que la contrarresta es el movimiento térmico del gas a la temperatura medida. La última columna muestra la mínima velocidad crítica de rotación, que debería añadirse al movimiento térmico para impedir el colapso gravitatorio de cada glóbulo en cuestión.

dades de rotación importantes; en caso contrario, los glóbulos se verían aplanados y tenderían, por tanto, a aparecer más o menos en forma de lente, a menos que los estuviéramos viendo a lo largo de su eje de rotación. Este argumento, esencialmente cualitativo, recibe un fuerte apoyo de los datos de la radioastronomía molecular.

Supongamos que estemos observando una nube en rotación cuyo eje de revolución no sea paralelo a la visual. Debido al efecto Doppler, los fotones emitidos por moléculas del borde de la nube que viene hacia nosotros estarán corridos hacia el azul, o incrementados en frecuencia, en una magnitud proporcional a la velocidad de rotación en ese borde. Recíprocamente, los fotones emitidos por las moléculas del borde opuesto de la nube, que se aleja de nosotros, estarán corridos hacia el rojo, o disminuidos en frecuencia, en la misma medida. Por tanto, si hacemos un gráfico de la emisión a lo largo de la cara de una nube en rotación, observaremos un desplazamiento sistemático en la frecuencia aparente de las rayas emitidas: el corrimiento total será el doble del de uno de los bordes de la nube.

Estos efectos de la rotación aparecerían inmediatamente si fueran de la magnitud requerida para impedir el colapso de una nube. En los ocho glóbulos de Bok de mi muestra, por el contrario, los corrimientos sistemáticos de velocidad que pueden atribuirse a la rotación son de menos de unos 0,7 kilómetros por segundo, o sea entre la mitad y un octavo de los valores necesarios para suprimir el colapso gravitatorio. Por consiguiente, a menos que todas las nubes de la muestra tengan sus ejes de rotación girados en más de 70 grados con respecto a la perpendicular a la visual, lo cual es extremadamente improbable, no parece haber la suficiente rotación para impedir el colapso.

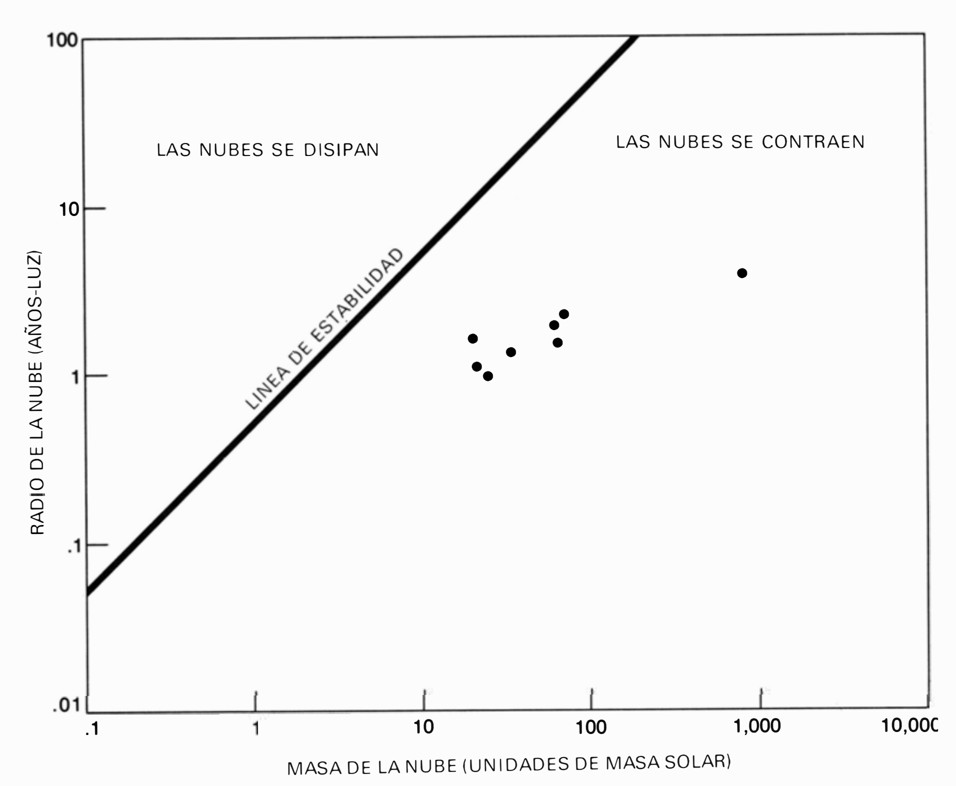


DIAGRAMA MASA-RADIO PARA GLOBULOS DE BOK. Muestra el emplazamiento de los ocho glóbulos estudiados por el autor con respecto a la "línea de estabilidad", calculada para una temperatura de la nube de 10 grados K. Este cálculo simplificado no considera la posible existencia de rotación, campos magnéticos y movimientos turbulentos, que podrían retardar el colapso. Las fuerzas retardadoras no se hallan a niveles tan altos como para suprimir la contracción gravitatoria.

Campos magnéticos

Es más difícil eliminar las otras dos posibles fuerzas retardadoras: campos magnéticos y turbulencia. El efecto inhibidor del colapso que tiene un campo magnético puede apreciarse fácilmente. Si uno intenta juntar los polos del mismo signo de dos imanes, sus campos se oponen fuertemente a la compresión. El mismo efecto podría actuar en los glóbulos de Bok, oponiéndose a las fuerzas gravitatorias que, en otro caso, llevarían al colapso. Es sabido que el medio interestelar general está impregnado por un campo magnético débil. En los lugares donde se puede hacer una estimación directa de la intensidad del campo (generalmente sólo en nubes difusas, que son mucho menos densas que los glóbulos) se encuentra que es típicamente unas 100.000 veces más débil que el campo magnético de la Tierra. Uno esperaría que el campo magnético, en una nube de gas condensada como es un glóbulo de Rok, fuera proporcionalmente mayor, debido sencillamente a la mayor densidad del glóbulo. Sin embargo, puede mostrarse que si los glóbulos se han formado por condensación gravitatoria gradual a partir del medio interestelar general, el incremento concomitante de la intensidad del campo magnético será insuficiente para impedir que continúe el colapso del glóbulo.

No obstante, esta representación sencilla de la condensación inicial de los glóbulos de Bok puede ser incorrecta. Se puede hacer un "experimento mental" en el que los ocho glóbulos de Bok de mi muestra mantengan su masa y temperatura, pero se expandan hasta que su densidad sea igual a la del medio a partir del cual presuntamente se han formado. Mirado de este modo, es difícil ver por qué, para empezar, tendrían que haber sido gravitatoriamente inestables.

Por tanto, es muy posible que los glóbulos hayan sido formados por algún acontecimiento externo fuertemente compresor, como la explosión de una supernova o el paso de una onda galáctica de densidad. En un proceso así, el débil campo magnético que indudablemente existía entre los protoglóbulos habría sido amplificado por la compresión. Si esto fue lo que sucedió, es enteramente posible que los campos magnéticos intensificados, junto con la presión térmica interna, estén ahora dispersando los glóbulos. Dado que no hay manera de medir la intensidad del campo magnético dentro de los glóbulos ¿cómo puede comprobarse esta posibilidad?

Hasta cierto punto, se puede invocar de nuevo la geometría de las nubes. Un campo magnético fuerte y bastante regular en el interior de los glóbulos tendería a hacer de ellos objetos muy alargados, cosa que no son. Los recientes trabajos teóricos de T. Ch. Mouschovias, de la Universidad de Princeton, y de J. M. Scalo, de la Universidad de Texas, proporcionan un argumento más cuantitativo. Mouschovias ha demostrado que, en general, la amplificación de un campo magnético en el transcurso de la contracción de una nube interestelar no es tan fuerte como se había llegado a creer. Los trabajos de Scalo indican que un campo fuertemente intensificado se saldrá lentamente de una nube oscura, proceso que

irá acompañado de un calentamiento del gas por rozamiento, a medida que el campo se desliza a través del gas. Cuanto más fuerte sea el campo magnético del glóbulo, tanto más fuerte debe ser el calentamiento que lo acompaña. Calculando la contribución de los diferentes mecanismos de calentamiento y de enfriamiento que actúan en el interior de nubes oscuras, Scalo ha mostrado que los campos magnéticos presentes no pueden ser muy fuertes. Si lo fueran, los glóbulos estarían considerablemente más calientes que los 10 grados K deducidos de las observaciones moleculares. Aunque estos argumentos no puedan considerarse concluyentes, parecen establecer importantes limitaciones en cuanto a la intensidad de los campos magnéticos disponibles para inhibir la condensación gravitatoria de los glóbulos de Bok.

Turbulencia

Finalmente, es preciso examinar el papel desempeñado por la turbulencia. En sentido amplio, la turbulencia se refiere al movimiento irregular, arremolinado, dentro de un fluido. Debido a que los remolinos deben chocar eventualmente unos con otros, la turbulencia en el interior de una nube proporciona una presión adicional, capaz de resistir a la autogravitación, y si la turbulencia fuese lo bastante intensa, podría deshacer por entero la nube. Incluso si una nube interestelar fuese perfectamente estática, los corrimientos Doppler asociados con los movimientos térmicos aleatorios de las moléculas dentro de una nube ensancharían ligeramente las rayas espectrales emitidas. En el caso de las moléculas de monóxido de carbono a 10 grados K, el ensanchamiento térmico de las rayas espectrales es equivalente a movimientos térmicos de alrededor de una décima de kilómetro por segundo. Las rayas espectrales efectivas de los glóbulos son mucho más anchas: equivalen a movimientos términos de unos cuantos kilómetros por segundo. Por tanto, debe haber movimientos internos apreciables, no térmicos, en las nubes.

Si la turbulencia fuese la responsable de la mayor parte del ensanchamiento no térmico de rayas observado en los glóbulos de Bok, las nubes ya no colapsarían más. De hecho, la turbulencia sería suficiente para dispersar un típico glóbulo de Bok en el breve tiempo, en términos astronómicos, de alrededor de un millón de años. Un análisis más exacto lleva, sin embargo, a una aparente paradoja. Unas corrientes turbulentas lo bastante fuertes como para hacer estallar un glóbulo necesitarían tener velocidades supersónicas. En tal caso sería de esperar que el gas se calentara fuertemente por las ondas de choque generadas por las colisiones de esas corrientes supersónicas. Para que las temperaturas de las nubes permanezcan tan bajas como se observa, el tiempo medio entre colisiones de los remolinos debe ser muy largo. Esto, a su vez, implica que los remolinos deben ser muy grandes, tanto, en definitiva, que su estructura turbulenta debería dar lugar a estructuras de corrimiento Doppler fácilmente resolubles con radiotelescopios.

Si suponemos que esta aparente paradoja elimina la turbulencia como causa dominante del ensanchamiento no térmico de las rayas observado en los glóbulos de Bok, ¿de qué otro modo podría explicarse el ensanchamiento? Esto nos vuelve a llevar al proceso cuya probabilidad habíamos estado intentando valorar: el colapso gravitatorio. Sabiendo las masas y los radios actuales de los glóbulos de Bok, podemos calcular aproximadamente la velocidad a la que están colapsando si las fuerzas retardadoras de los campos magnéticos, la rotación y la turbulencia resultan, en realidad despreciables. El correspondiente colapso en caída libre de la nube debe producir también un ensanchamiento de las rayas espectrales, que proviene de la emisión molecular con corrimiento Doppler a lo largo de cualquier visual que atraviese el gas que colapsa. Pese a lo groseros que han de ser tales cálculos, las anchuras previstas de las rayas, debidas al colapso, se corresponden bastante bien con las observaciones. Por tanto, sobre la base de los datos actuales parece plausible que los glóbulos sean nubes en colapso gravitatorio y, en consecuencia, probables emplazamientos de formación de estrellas. Verdaderamente, es notable que el sencillo esquema que hemos discutido aguante tan bien. Esto es en parte atribuible a la esencial simplicidad de unos glóbulos que constituyen unidades aisladas y casi perfectamente esféricas, cuya física interna es de un alcance mucho más restringido que la de las nubes moleculares masivas. Debe reconocerse, no obstante, que una descripción rigurosa de los glóbulos debe terminar por tener en cuenta todos los procesos físicos que deben estar actuando en su interior. Aunque la rotación, los campos magnéticos y la turbulencia no basten, probablemente, para impedir el colapso final de tales nubes, dichos fenómenos deben desempeñar papeles importantes en su evolución.

La confirmación más fuerte de la hipótesis de que los glóbulos de Bok se encuentran actualmente en proceso de colapso para formar estrellas sería, desde luego, encontrar por lo menos un glóbulo de Bok en el que estuviera en trance de nacimiento una nueva estrella o un pequeño cúmulo de estrellas. La probabilidad de semejante descubrimiento es escasa, ya que un glóbulo típico tiene una masa sólo 100 veces mayor que la del Sol. La masa de una gran nube molecular típica, asociada con una región H_{II}, en donde se sabe positivamente que se forman estrellas, es de decenas de miles de masas solares.

La búsqueda de nuevas estrellas

Sin embargo, W. E. Herbst, de la Universidad de York, y D. G. Turner, de la Universidad de Toronto, han informado recientemente que un glóbulo conocido por Lynds 810 (no incluido en mi estudio) parece tener inmersa en él una estrella joven bastante caliente, y posiblemente varias de ellas. Las estrellas (si es que hay más de una) están íntimamente asociadas con el gas y el polvo interestelares cercanos, a partir de los cuales pueden haberse formado. El polvo difunde la luz de las estrellas englobadas, creando así una pequeña nebulosa de reflexión, aparentemente asociada con el glóbulo. Resulta tentador conjeturar que las estrellas se hayan formado recientemente a partir del glóbulo mismo. A la distancia que le asignan Herbst y Turner, Lynds 810 resulta tener un radio de cuatro o cinco años-luz, lo cual lo hace ligeramente mayor que Barnard 5, el glóbulo más grande de mi muestra. Se están haciendo ahora observaciones de las rayas moleculares, en la Aerospace Corporation, para ver si Lynds 810 se parece a Barnard 5 en masa y temperatura.

La posibilidad de que al menos los glóbulos de Bok más masivos,como Barnard 5, puedan acabar originando estrellas rodeadas por nebulosas de reflexión, es emocionante. Recientemente, M. L. Kutner, del Instituto Politécnico Rensselaer, K. D. Tucker, de la Universidad de Fordham, y yo, hemos emprendido un amplio estudio de las rayas moleculares de nubes interestelares asociadas con nebulosas de reflexión. Con observaciones del monóxido de carbono de esas nubes debería poderse determinar sus masas. Si algunos de esos objetos resultan tener masas del orden de 100 a varios centenares de masas solares, será difícil escapar a la conclusión de que los glóbulos de Bok de mayores masas son centros de formación de estrellas.

Memoria espacial

Un animal es capaz de recordar, entre otras muchas cosas, los lugares donde estuvo antes. Los experimentos con ratas sugieren que este tipo de memoria se localiza en la región del cerebro denominada hipocampo

David S. Olton

La aptitud que posee un animal para mantenerse constantemente informado acerca de su ubicación en el espacio depende del recuerdo de los lugares donde ha estado antes, y es un componente básico de la conducta inteligente. Según las ideas más modernas al respecto, esta aptitud entraña una forma de memoria a corto plazo, que puede llamarse memorización, memoria operante o memoria activa, la cual almacena información en tanto que ésta va siendo elaborada o procesada. (Un ejemplo verbal corriente es el hecho de recordar el número que se acaba de encontrar en el listín telefónico mientras se marca este mismo número.) ¿Cómo está programada esta memoria espacial? ¿Presenta una localización cerebral determinada? ¿Está asociada a la actividad de células nerviosas específicas? Estas preguntas han sido contestadas actualmente, por lo menos en parte, gracias a experimentos psicológicos y fisiológicos realizados con roedores.

Se da uno cuenta de la importancia de la memoria espacial para la supervivencia de un animal cuando se observan conductas como la del pipí hawaiano, un pájaro que se alimenta del néctar de las flores. Cada una de las flores de su territorio puede proporcionarle néctar en una serie numerosa de visitas, pero el suministro de néctar en cada una de estas visitas es limitado, y debe transcurrir cierto tiempo para que se reponga. Si el pájaro vuelve a la flor demasiado pronto, encuentra poco o ningún néctar en ella. Por tanto, la estrategia óptima a seguir es nutrirse de las flores restantes antes de volver a la primera que se visitó, dando a cada flor el mayor tiempo posible para que reponga su néctar. Alan C. Kamil, de la Universidad de Massachusetts, ha estudiado al pipí hawaiano en su hábitat natural, hallando que, efectivamente, tiende a seguir la referida estrategia: su memoria de la ubicación de las flores visitadas recientemente resulta ser significativamente superior a la que podría esperarse por el simple azar, de modo que raramente vuelve a una flor si no ha transcurrido el tiempo suficiente para que se haya llenado nuevamente de néctar.

También se ha demostrado la importancia de la memoria espacial mediante experimentos de laboratorio. Cuando en un lugar determinado se localizan de forma estable recompensas y castigos, los animales del experimento aprenden rápidamente a obtener las recompensas y a evitar los castigos. E incluso cuando dichas recompensas y castigos se correlacionan con algún estímulo distinto del espacial (por ejemplo, una luz), los animales todavía tratan de resolver el problema, en un primer intento, basándose en sus rasgos espaciales, volviéndose, pongamos por caso, de manera persistente hacia la derecha o hacia la izquierda, en vez de responder a la localización de la luz. Sólo después del fracaso de tales intentos el animal empieza a probar nuevas estrategias.

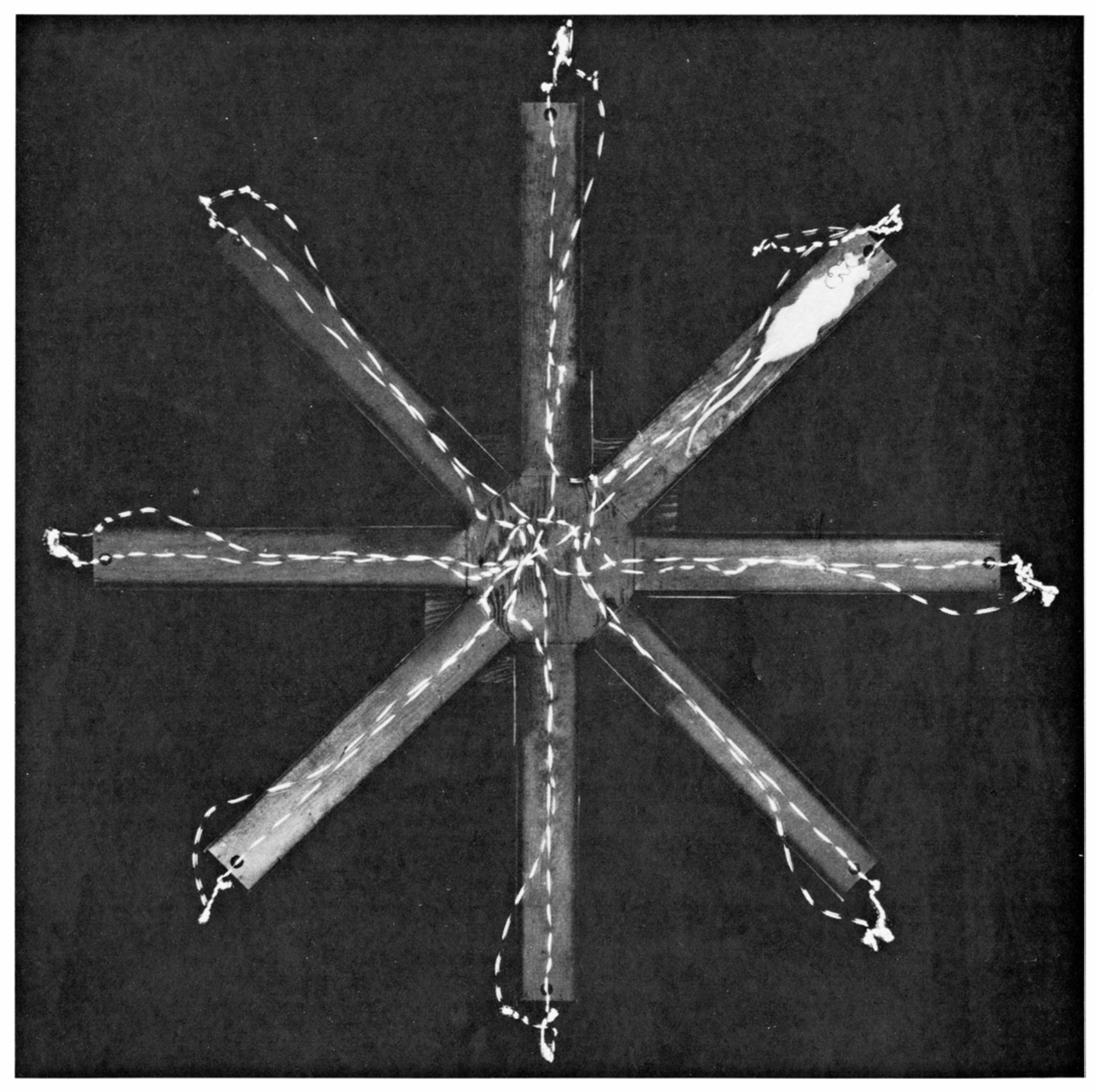
A fin de acceder a una mejor visión de la cuestión planteada –cómo utilizan los animales la memoria activa para resolver los problemas espaciales–, mis colegas de la Universidad Johns Hopkins y yo ideamos un nuevo procedimiento experimental que nos permitiese estudiar dicha memoria. Nuestro diseño experimental se basó en el laberinto espacial, aparato que desde principios de siglo se ha venido usando en la investigación de la conducta animal. Estos laberintos son de complejidad variable y su forma puede variar desde una simple T hasta la réplica en miniatura del famoso laberinto de setos de Hampton Court, cerca de Londres. El fallecido Edward C. Tolman, de la Universidad de California en Berkeley, era un decidido defensor de la utilización de los laberintos para explorar las aptitudes cognoscitivas de los animales; este investigador creía que el componente principal de la solución del problema era la aptitud del animal para descubrir las instrucciones del experimentador. En este sentido, los laberintos son muy útiles, porque las instrucciones son inherentes al aparato mismo.

En nuestros experimentos quisimos dar a los roedores instrucciones que consistieran esencialmente en la estrategia del pipí hawaiano: recordar una lista de lugares en donde podía encontrarse comida y visitar después cada uno de los lugares restantes antes de volver al primero. Con objeto de presentar con claridad estas instrucciones a los animales confeccionamos un laberinto con ocho brazos radiales, elevados y sostenidos por unos soportes. Al comienzo de la prueba se colocaba una pastilla de comida en el extremo de cada brazo. Se ponía a continuación el animal en el centro del aparato y se le dejaba que escogiera libremente el camino a seguir, hasta obtener las ocho raciones de comida. La estrategia óptima era, evidentemente, recorrer cada brazo una sola vez, no volviendo a él, de forma que las ocho primeras elecciones afectasen a cada uno de los ocho brazos. De esta manera, el sujeto de experimentación podía apoderarse de las ocho pastillas de comida

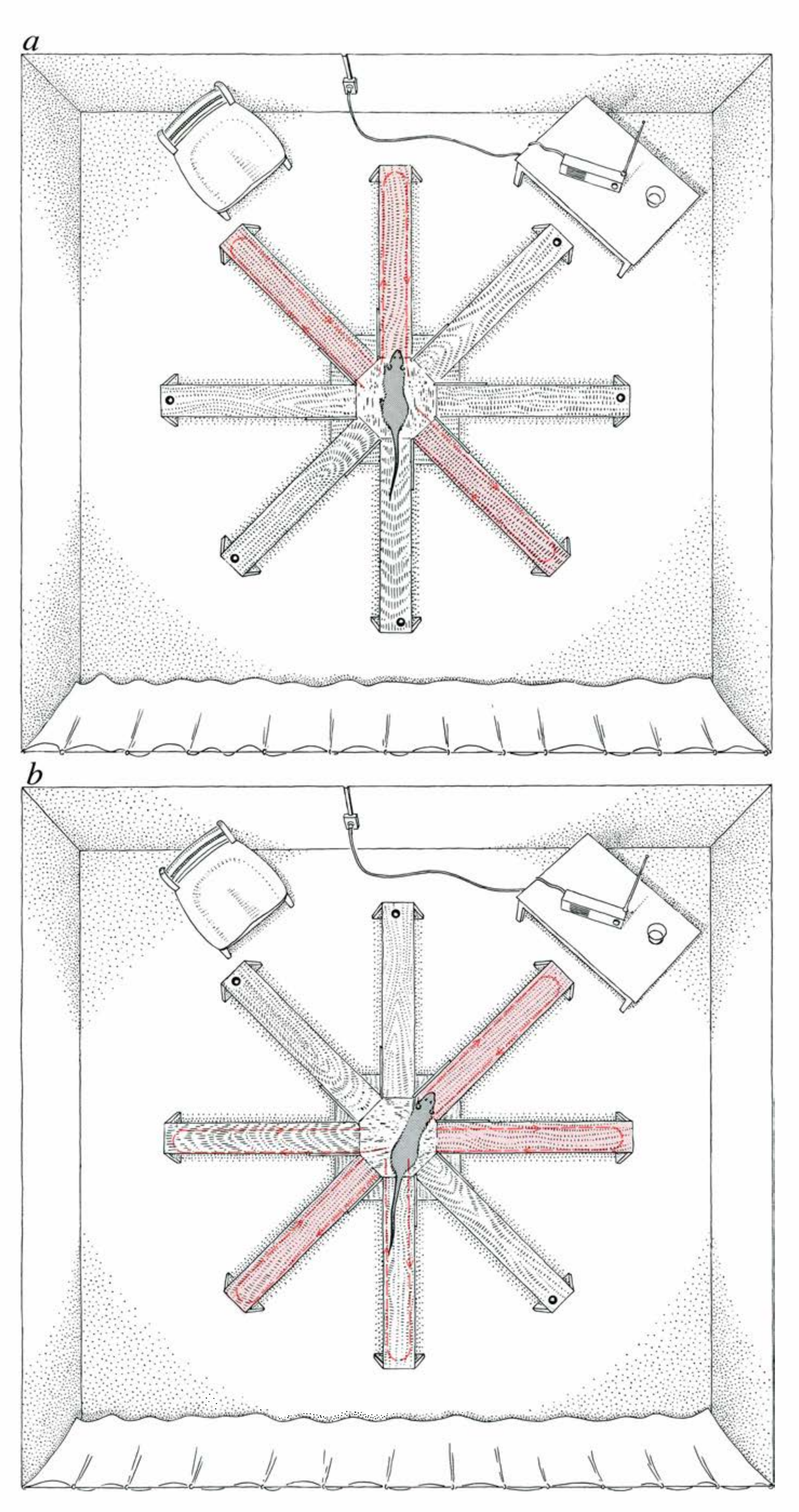
con un recorrido mínimo por el laberinto.

Hasta ahora los animales que hemos sometido a prueba en el laberinto radial han sido, principalmente, ratas de laboratorio, pero hemos obtenido resultados similares con la primera generación de descendientes de ratas salvajes y con gerbos. Todos ellos aprendieron rápidamente y su nivel de ejecución fue bueno. Para que corrieran sobre los pasos elevados se les adiestró durante unos cuantos días, tras lo cual obtuvieron un promedio de 6,8 respuestas correctas en las ocho primeras elecciones; veinte días después habían mejorado hasta alcanzar un promedio de 7,8 respuestas correctas. Como el animal retornaba a la plataforma central tras cada respuesta, por lo cual en cada nueva elección disponía de ocho brazos para escoger, la probabilidad de realizar siete respuestas correctas, como mínimo, por casualidad, era muy baja (0,07). No obstante, hacia el final del experimento cada uno de los sujetos logró ese nivel de éxitos, y esto durante diez días consecutivos (una probabilidad de $0{,}07^{10}$), resultando extremadamente improbable que su actuación fuese efecto del puro azar.

Había dos explicaciones teóricas fundamentales para dar cuenta de la excelente ejecución de los roedores en el interior del laberinto radial. O bien identificaban la posición de los brazos ya visitados comparándolos con hitos presentes en el espacio circundante, o bien seguían alguna estrategia más sencilla que les exigía almacenar una menor cantidad de información en su memoria activa; una estrategia semejante implicaría el uso de un algoritmo o una regla, como por ejemplo: "Escoger los brazos adyacentes en la dirección de las agujas del reloj". En la memoria activa sólo tendría que guardarse la estrategia general; los



RUTA SEGUIDA POR UNA RATA NORMAL al recorrer un laberinto radial de ocho brazos. Fotografía obtenida en el laboratorio del autor, fijando una luz intermitente en la cabeza del animal y prolongando la exposición durante dos minutos. La estrategia óptima consiste en visitar una vez cada brazo, apoderándose de la pastilla de comida colocada en su extremo. Esta tarea exige del animal que no llegue a perder contacto con las localizaciones espaciales que ha visitado anteriormente, almacenándolas así en la memoria a corto plazo o "activa".



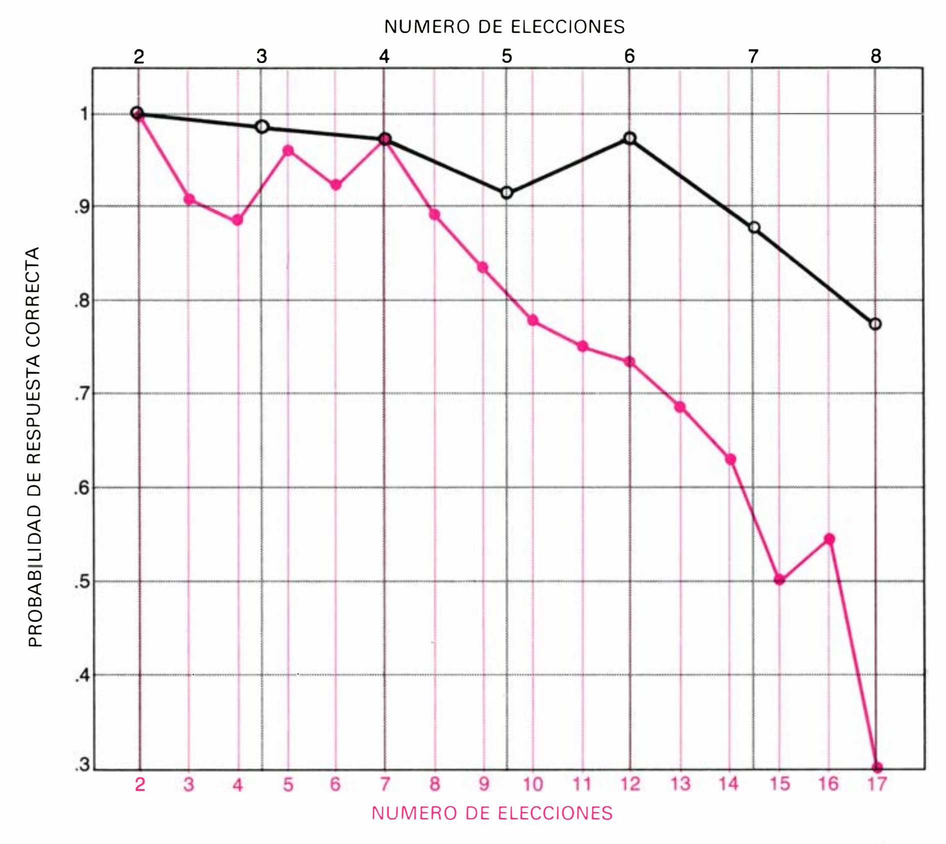
EL EXPERIMENTO DEL GIRO DEL LABERINTO demuestra que las ratas no identifican los brazos ya visitados marcándolos con una feromona o un olor. Primeramente se dejó que la rata escogiera tres brazos *(a)*. Después se hizo describir un giro al laberinto hasta que los brazos recorridos antes *(en color)* ocuparan localizaciones todavía no escogidas. Entonces se volvieron a cebar los brazos y se permitió al animal efectuar otras cinco elecciones *(b)*. En vez de evitar los brazos ya recorridos (como pronosticaba la teoría de señales olfatorias), el animal eligió las cinco localizaciones espaciales no visitadas aún, a pesar de que ello suponía volver a brazos ya visitados. Esto sugiere que los animales recuerdan los brazos relacionándolos con estímulos de la habitación.

brazos escogidos en cada caso particular podrían olvidarse inmediatamente después de cada elección. Otra estrategia sería utilizar una señal de verificación de roedor; acaso un rótulo olfativo dejado a la entrada de cada brazo ya recorrido. Así también podrían olvidarse las diferentes elecciones particulares, pues dicho rótulo quedaría como recordatorio permanente.

La hipótesis del algoritmo es fácil de rechazar, por cuanto la secuencia diaria de brazos escogidos no era lo bastante estable como para atribuir la gran precisión de las elecciones a la acción de una regla determinada. La posibilidad de que las ratas marcaran los brazos ya visitados con un distintivo de alguna clase era más difícil de valorar y exigía un experimento adicional. Con este propósito consideramos los hitos de la habitación circundante, así como los hipotéticos rótulos dispuestos dentro del laberinto como indicios "pertinentes y redundantes": pertinentes porque cualquiera de los dos podía guiar la conducta de elección; redundantes porque en la situación habitual de prueba ambos tipos de indicios se manifestaban al mismo tiempo. A fin de valorar la relativa importancia de estos dos tipos, los separamos, haciéndolos no redundantes. Para lograrlo dejábamos que los animales eligieran por tres veces y, acto seguido, hacíamos girar el laberinto (quedando el animal confinado en su centro), hasta una nueva posición. De este modo se separaban los indicios de lugar (que no cambiaban) de los hipotéticos rótulos (que giraban con el laberinto). Los tres brazos que ya habían sido visitados por el animal se volvían a cebar, de forma que nuevamente hubiera pastillas de comida en todos ellos. Luego se permitía que el sujeto escogiera libremente entre todos los brazos, hasta haber recorrido en sus elecciones otros cinco (hasta un total de ocho). Nos encontramos con que los animales tendían a evitar las tres localizaciones espaciales elegidas en primera instancia, aunque la rotación del laberinto hubiese situado brazos que no habían sido visitados previamente, por lo que debían carecer de "rótulos" en esos emplazamientos. En consecuencia, estos resultados muestran que los animales no seguían una estrategia de rotulación del laberinto.

Seguidamente nos preguntamos si las ratas aprendían un mapa espacial que las capacitaba para comprender las relaciones entre todas las partes del laberinto, o si aprendían simplemente una especie de lista de lugares independientes y no relacionados entre sí. John A. Walker,

estudiante graduado de la Johns Hopkins, ideó un procedimiento de comprobación, sirviéndose de un laberinto de cuatro brazos. Primeramente se colocaba la rata en el extremo de un brazo y se le permitía que obtuviera allí su ración de comida, en vez de dejar que se apoderara de ella en un brazo de su propia elección. Luego se devolvía el animal a la plataforma central y se le daba libertad para que escogiese uno de los brazos. Por consiguiente, la rata sólo podía recordar en dónde había estado valiéndose de estímulos espaciales existentes en el extremo del primer brazo, debiendo realizar el resto de sus elecciones a partir de estímulos existentes a la entrada de todos los brazos. Sólo mediante una afortunada asociación de los dos conjuntos de estímulos espaciales –los del extremo y los de la entrada– podía el animal solucionar el problema.



LA PRECISION EN LAS ELECCIONES DECRECE en una prueba a medida que aumenta el número de elecciones correctas. Este fenómeno se observa tanto en el laberintoto de ocho brazos *(en negro)* **como en el de diecisiete** *(en color).* **Los experimentos del autor parecen indicar que esta disminución se debe a una interferencia entre los elementos almacenados en la memoria activa.**

Pues bien, encontramos que este procedimiento no presentaba dificultades para los animales. Después de unos pocos días de adaptación a la situación de verse depositados en el extremo de un brazo, hacían su elección con la misma exactitud de que habían hecho gala en el procedimiento normal, y no volvían al brazo en cuyo extremo habían sido colocados. Estos resultados sugerían que los animales habían aprendido verdaderamente un mapa del laberinto, el cual les permitía entender las relaciones espaciales entre sus diversas partes. Además, puesto que los animales fueron colocados en el extremo de un brazo, nunca tuvieron ocasión de dejar a su entrada un rótulo que identificase ese brazo, lo cual demuestra una vez más la ausencia de una estrategia de rotulación del interior del laberinto.

A fin de investigar más a fondo la naturaleza de la memoria espacial, hicimos una serie de experimentos para estudiar si el recuerdo que los animales guardaban de la lista de brazos ya visitados tenía alguna característica en común con la manera en que el ser humano aprende los elementos de una lista. Una de dichas características es que la capacidad de la memoria activa es limitada: cuantos más elementos se almacenan, peor se recuerdan. Cuando pasamos la prueba a ratas, tanto en el laberinto de ocho brazos como en uno de diecisiete, descubrimos que en ambos se producía una disminución significativa de las probabilidades de respuesta correcta a medida que aumentaba el número de elecciones.

Contábamos con dos teorías que explicaban la decreciente exactitud del comportamiento electivo durante una prueba. La primera suponía que la huella de la memoria se deterioraba gradualmente con el tiempo, al igual que ocurre con una fotografía cuando envejece, de modo que el recuerdo de las primeras elecciones disminuía a medida que avanzábamos en la prueba, incrementándose la probabilidad de un retorno a esos brazos. La segunda teoría proponía que la información no se olvidaba a causa del tiempo transcurrido *per se,* sino porque el almacenamiento de las primeras elecciones en la memoria activa interfería con el almacenamiento de elecciones ulteriores. Con vistas a diferenciar estas dos explicaciones, separamos tiempo y elecciones, variando el tiempo que los animales necesitaban para terminar una prueba.

En ciertos experimentos doblamos aproximadamente la duración de la prueba, instalando unas puertas de guillotina a la entrada de cada brazo. Estas puertas se bajaban después de cada visita o elección, confinando al animal en el centro del laberinto durante unos 20 segundos. En otros experimentos, el tiempo de la prueba se redujo a la mitad, más o menos, poniendo agua en la plataforma central y facilitando así a los sujetos la ingestión de las pastillas secas. En estas condiciones, la hipótesis del deterioro de las huellas de la memoria predice que los animales se desenvolverán mejor que lo normal cuando la prueba sea más breve y peor cuando sea más larga; por su parte, la teoría de la interferencia pronostica que la referida manipulación de variables no tendrá efecto alguno sobre los resultados, ya que el número de elecciones hechas por el animal es el mismo.

Comprobamos que el nivel de actuación de los animales no fue peor ni mejor de lo normal, tanto si la prueba se acortaba como si se prolongaba. Además, los experimentos adicionales demostraron que existía poco o ningún deterioro de la memoria activa espacial durante períodos de hasta una hora. Así pues, parece que en esta tarea el olvido a corto plazo se debe a la mutua interferencia de elementos más que a un deterioro de las huellas de la memoria.

Otra característica de la memoria inmediata o activa que hemos venido examinando es el factor "orden", es decir, el efecto que se deriva del orden en que los elementos van ingresando en la memoria. Como ejemplo, imaginemos que se ha de aprender una lista compuesta por las ocho palabras siguientes: casa, gato, coche, amor, pupitre, pared, naipe, remiendo. Si el sujeto es como la mayoría de las personas, recordará los dos primeras palabras de la lista y las dos

últimas mejor que las del medio. De ahí que el orden en que los elementos de la serie ingresan en la memoria pueda afectar la precisión del recuerdo.

Teniendo presente este fenómeno psicológico humano, buscamos el mismo efecto de orden serial en la forma de almacenar elementos de la memoria espacial de los roedores; para ello estudiamos su nivel de actuación al elegir los brazos, con objeto de averiguar si los animales hacían menos faltas relativas a las primeras y últimas elecciones de la prueba. Pero esta divergencia no parecía existir: cuando se presentaba un error era tan probable que se manifestase en la repetición de los elementos extremos como en la de los centrales. De este hecho se deduce que, o bien los roedores no almacenan sus elecciones espaciales en un orden serial determinado, o bien el almacenamiento de elementos en serie no afecta la precisión de su recuerdo, al contrario de lo que sucede en el hombre.

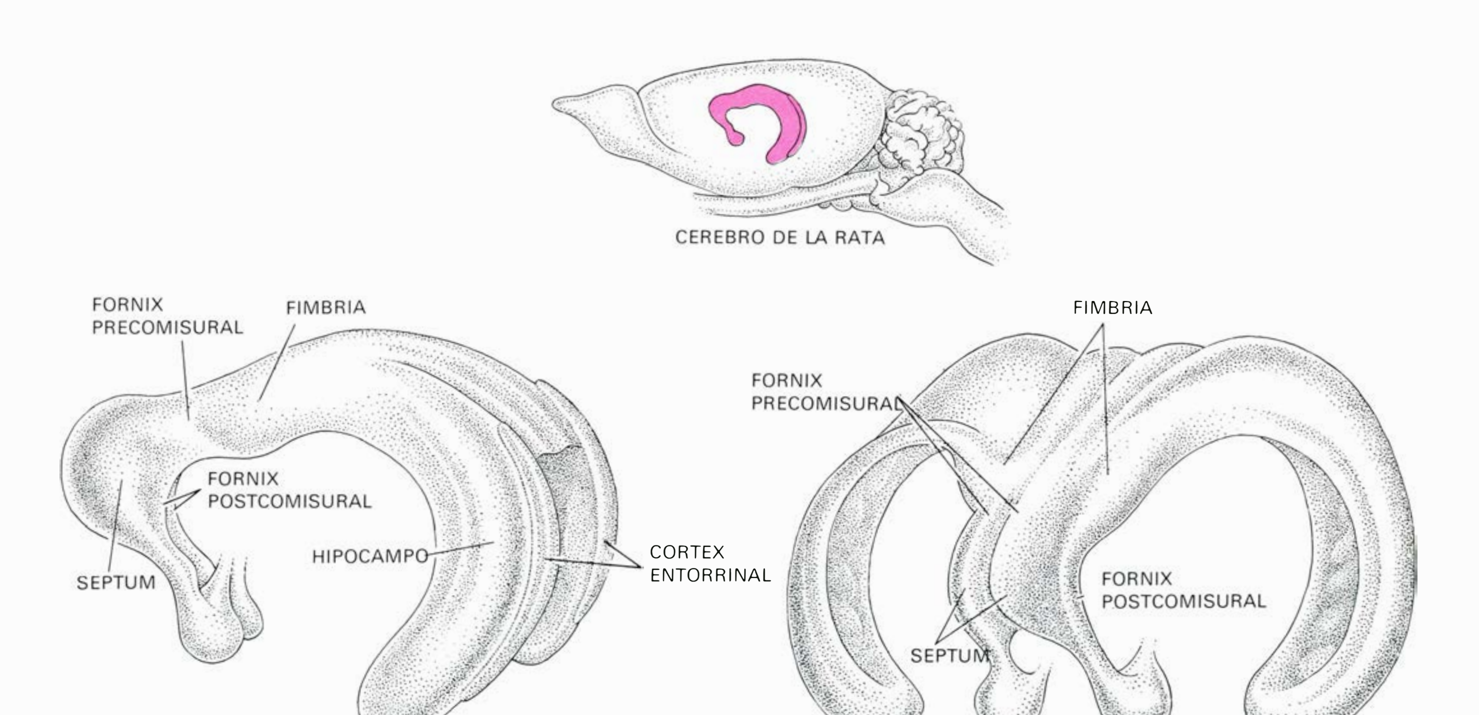
Finalmente investigamos la aptitud de los animales para aislar la información espacial de una prueba, de modo que no interfiera con su actuación en otra posterior. Dado que la capacidad de la memoria activa es limitada, el método ideal sería librarla con toda la rapidez posible de toda la información antigua e innecesaria, con el fin de que pudiera acumular la máxima cantidad de información nueva. En los experimentos con sujetos humanos se llama "reinserción" a este proceso. Con el propósito de determinar si los roedores pueden también reinsertar información en su memoria activa, mediante la eliminación de la antigua, hicimos pasar ocho pruebas inmediatamente consecutivas a los animales en el laberinto de ocho brazos. El animal advertía que una prueba había terminado porque se le extraía brevemente del aparato. Averiguamos que, aunque, tal como esperábamos, la precisión en la elección de los distintos brazos disminuía dentro de cada prueba al aumentar el número de elecciones efectuadas, dicha precisión mejoraba notablemente en los comienzos de la prueba siguiente, indicando que los animales estaban realizando, efectivamente, una reinserción de información en su memoria activa entre una y otra prueba.

Una vez conseguido el objetivo de establecer una prueba adecuada para la memoria activa espacial de animales, dirigimos nuestra atención hacia los mecanismos cerebrales subyacentes a este tipo de memoria. En particular nos interesaba la región del cerebro llamada hipocampo (del griego, "caballito de mar", al cual se parece por su curvatura alrededor de la zona central del cerebro). Robert L. Isaacson y el autor habíamos llevado a cabo algunos experimentos en la Universidad de Michigan, los cuales sugerían que, tras una lesión hipocámpica, las ratas hallan dificultad en distinguir entre las mitades derecha e izquierda de un laberinto simple, lo que no sucede en animales normales. Varios investigadores más, en particular Helen Mahut, de la Northeastern University, notaron también que los animales con lesión hipocámpica solían encontrarse en apuros al ejecutar tareas espaciales.

John O'Keefe y Lynn Nadel, del University College London, fueron los primeros en hacer una exposición teórica formal del papel del hipocampo en la conducta espacial. Ambos proporcionaron pruebas experimentales de que el hipocampo forma el mapa espacial que los animales utilizan para orientarse en el espacio. En un experimento que realizaron junto con Abraham H. Black, de la McMaster University, adiestraron ratas en la actividad de trasladarse de un compartimiento a otro para evitar una descarga eléctrica, descubriendo que los animales normales aprendían a asociar la descarga con la localización espacial del compartimiento con respecto a la habitación, mientras que las ratas con lesión en el sistema hipocámpico parecían ignorar totalmente las características espaciales de la tarea. Como las ratas que se mueven por un laberinto de brazos radiales se apoyan en información espacial al escoger cada brazo, pensamos que valía la pena observar el efecto de la lesión experimental del hipocampo en la precisión de las elecciones.

Las ratas poseen un hipocampo grande y bien formado, cuyas conexiones con otras partes del cerebro han sido estudiadas ampliamente por Walle J. H. Nauta, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, y Theodor W. Blackstad, de la Universidad de Aarhus. La conexión principal está en el córtex entorrinal, situada tras el hipocampo y que conecta a éste con las áreas cerebrales encargadas de procesar la información sensorial. Una segunda conexión lo empalma, a través del fórnix (que significa arco), con las estructuras profundas del cerebro relacionadas con la motivación y la emoción. El fórnix se divide en dos partes: una parte superior que pasa a través del septum, en el centro del cerebro, y que se llama fórnix precomisural y otra inferior que rodea al septum, y se

LA INFORMACION ANTIGUA SE ELIMINA de la memoria activa después de cada prueba en el laberinto espacial. De este modo, puede almacenarse una cantidad máxima de información nueva. Este proceso, denominado reinserción, se puso de manifiesto sometiendo una rata a una serie de pruebas en el laberinto de ocho brazos y sacándola brevemente del aparato entre prueba y prueba. La precisión en las elecciones recuperaba su máximo nivel al principio de cada experimento.



EL HIPOCAMPO es una estructura situada en el centro del cerebro, en este caso de la rata. Su nombre deriva del griego "caballito de mar", por su forma. Se conecta a través del fórnix a las estructuras profundas del cerebro y a otras de nivel más alto pasando por el córtex entorrinal.

TERMINO MEDIO DE RESPUESTAS CORRECTAS

8
7
6
5
0

SIN LESION
CORTEX ENTORRINAL
FIMBRIA
FORNIX POSTCOMISURAL
SEPTUM

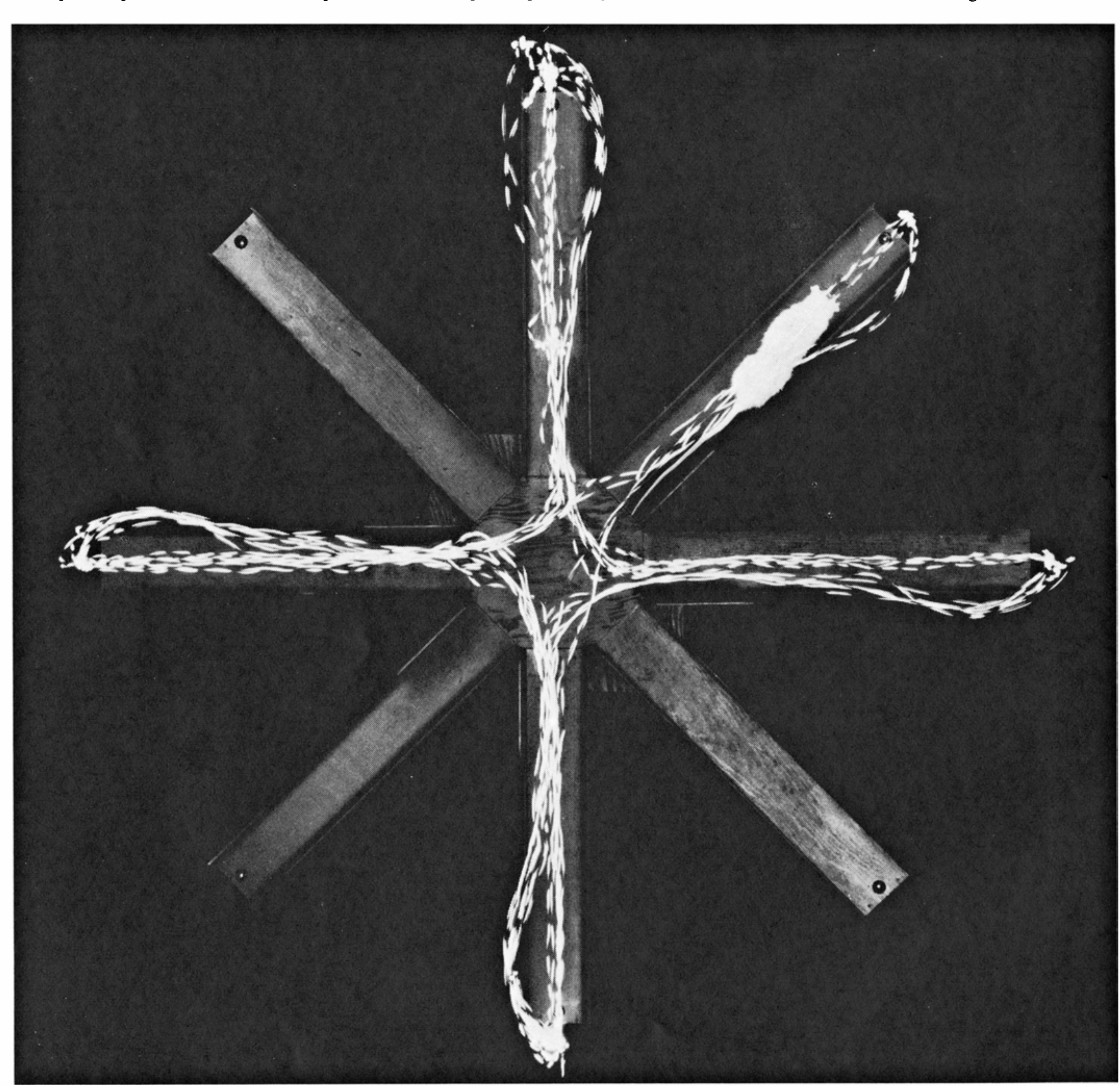
LAS LESIONES DEL HIPOCAMPO rebajan la actuación de los roedores en el laberinto radial, en comparación con la normal *(en color)*, lo que sugiere que el hipocampo es indispensable para la memoria activa espacial. El efecto desorganizador es específico respecto del hipocampo (las lesiones de otras zonas producen poco o ningún efecto), efecto que es el mismo cuatro días *(gris oscuro)* o cincuenta días *(gris claro)* después de la operación. Al dañar cualquier parte del circuito hipocámpico, se pone de manifiesto una perturbación semejante de la conducta.

llama fórnix postcomisural. La región donde ambas zonas se juntan se denomina fimbria del fórnix.

En nuestros experimentos se entrenaba primeramente a los animales en el laberinto radial hasta que su actuación era estable. Entonces se les anestesiaba y lesionaba quirúrgicamente, cortando una de las conexiones hipocámpicas. Los animales de control sufrieron el procedimiento quirúrgico completo, a excepción de la lesión en sí. Transcurridos unos cuantos días, necesarios para recuperarse de la operación, se les volvió a someter a la prueba del laberinto radial. Hubo dos períodos de prueba: uno que empezaba cuatro días después de la operación, a fin de examinar los efectos agudos de la lesión cerebral, y otro que empezaba cincuenta días después de la operación, para determinar si el déficit provocado por la lesión en la conducta podía disminuir con el tiempo. En ambos casos deseábamos conocer si un animal que había sido operado podía actuar tan bien como otro que no lo hubiera sido, y, en caso contrario, la manera exacta en que la lesión cerebral afectaba a dicha actuación.

La operación en sí no tuvo efectos significativos sobre los animales de control. La lesión del córtex cerebral, un área no relacionada directamente con el hipocampo, no ejerció influencia alguna sobre la conducta. Sin embargo, la destrucción de cualquier parte del sistema hipocámpico empeoró profundamente la ejecución en el laberinto, tanto durante el período inmediatamente posterior a la operación como en el iniciado cincuenta días después. Las lesiones en el núcleo caudado, otra área no hipocámpica, tuvieron un efecto ligeramente desorganizador, pero no de la misma magnitud que el ocasionado por las lesiones del hipocampo.

La falta de efectos importantes sobre la conducta, subsiguientes a la lesión de otras áreas cerebrales, indica que el empeoramiento de la actuación espacial no se debe a la desorganización de un



CONDUCTA ANORMAL EN EL LABERINTO de una rata con lesión de fórnix (exposición prolongada de la placa). La notable repetición de una secuencia de elecciones, calificada como perseverancia, aparece a menudo en estos animales. Es posible que la lesión del hipocampo destruya la aptitud del animal para aprender un mapa cognoscitivo del laberinto, forzándolo a apoyarse en una estrategia más sencilla.

sistema cualquiera del cerebro de los roedores, sino que parece estar asociado de forma particular con las lesiones del hipocampo. Otro punto interesante es la similitud en el grado de déficit observable tras la destrucción de cada una de las conexiones del hipocampo. Se podrían postular muchos diagramas de circuito distintos para representar la función hipocámpica, pero como la conducta queda desorganizada de modo idéntico tras cualquier lesión en el sistema, el número de alternativas aceptables queda limitado.

Los cambios surgidos tras las lesiones parecen ser irreversibles, aún cuando se ha demostrado que el hipocampo es una región cerebral de gran plasticidad, la cual se reorganiza por sí misma tras sufrir diferentes tipos de lesión. Gary Lynch, de la Universidad de California en Irvine, y Oswald Steward, de la Universidad de Virginia, han probado que, tanto después de la destrucción del cuerpo del fórnix como del área entorrinal, muchas de las fibras del hipocampo rebrotan y proyectan nuevas conexiones en unos pocos días. Dado que en nuestros experimentos los animales no actuaron mejor a los cincuenta días de la operación de lo que lo habían hecho inmediatamente después de la misma, los cambios debidos a la plasticidad no parecen tener importancia funcional para el animal en este tipo de tarea.

Hasta aquí habíamos verificado que los animales cuya función hipocámpica había sido desorganizada por lesiones tenían grandes dificultades para actuar bien en el laberinto radial. Visto esto, intentamos delimitar las características de esta dificultad. Algunas de las explicaciones posibles fueron descartadas rápidamente. Tras la lesión cerebral, los animales mostraban igual coordinación que antes en el laberinto, y no manifestaban ninguna tendencia a caer de los brazos elevados o a errar en la entrada. De hecho, los animales corrían ligeramente más deprisa que lo normal y sin vacilación alguna, resultando así evidente que el empeoramiento de la conducta de elección no se debía a ningún déficit primario, motor o sensorial.

De muchos experimentos, como los de Isaacson (actualmente en la Universidad de Florida), se desprende que lo que caracteriza la conducta de los animales con lesión hipocámpica es su "perseverancia", o sea, su reiteración en los errores, una vez tras otra, con mayor frecuencia de lo que se esperaría al azar. En nuestros experimentos, los animales con lesión hipocámpica también exhibieron curiosas repeticiones de las secuencias de elección, conducta raramente observada en animales normales. Una rata, por ejemplo, escogió los brazos 2, 4, 6 y 8 en las primeras cuatro elecciones, y después repitió esta misma secuencia dos veces más antes de efectuar la siguiente respuesta correcta. Otro animal escogió brazos opuestos, respondiendo primero al 1 y luego al 5, y repitiendo cinco veces la secuencia. Este tipo de conducta es el que se esperaría en el caso de que los animales perseverasea activamente en sus elecciones.

La significación de esta perseverancia es todavía una cuestión sin solucionar. Actualmente parece haber dos teorías alternativas que explican el efecto sorprendente de las lesiones hipocámpicas. Primeramente, es posible que las mencionadas lesiones no destruyan la memoria espacial, sino que desorganicen otras funciones cognoscitivas. En tal caso, el animal sería capaz de discriminar entre las elecciones correctas e incorrectas, pero su aptitud para poner en práctica decisiones estaría desfasada, como la de un jugador de bolsa que, sistemáticamente, comprara a la alza antes de que los valores y acciones bajaran de cotización y vendiera en descubierto, a la baja, antes de la subida de los mismos. La segunda posibilidad es que las lesiones del hipocampo destruyan la memoria espacial y que las ratas, en vez de comportarse sobre la base de estímulos espaciales, traten de efectuar una compensación, utilizando un conjunto diferente de estímulos para controlar su conducta; tal sería una secuencia aprendida de movimientos musculares o una estrategia de indicios topográficos.

Para comprender estos últimos conceptos, supóngase que un habitante de Nueva York quiera viajar a San Francisco, luego a Miami y luego a Nueva York. Si posee un mapa mental de Estados Unidos, sabrá que San Francisco está al Oeste de Nueva York y Miami al Sur. Por consiguiente, también sabrá que debe ir primero hacia San Francisco, en dirección oeste, y después hacia Miami, en dirección sudeste. Sin embargo, este viajero también podría realizar su trayecto sin tener idea de dónde se encuentra. En vez de confiar en sus conocimientos geográficos, podría seguir una estrategia de indicios que se basara en el hecho de que Nueva York y San Francisco están unidas por la ruta 80 y Nueva York y Miami por la 95. Esta estrategia le llevaría felizmente a su destino, pero una vez en San Francisco no tendría idea de cómo ir directamente a Miami, debiendo retroceder hacia Nueva York por la ruta 80 y tomar después la 95, rumbo a Miami.

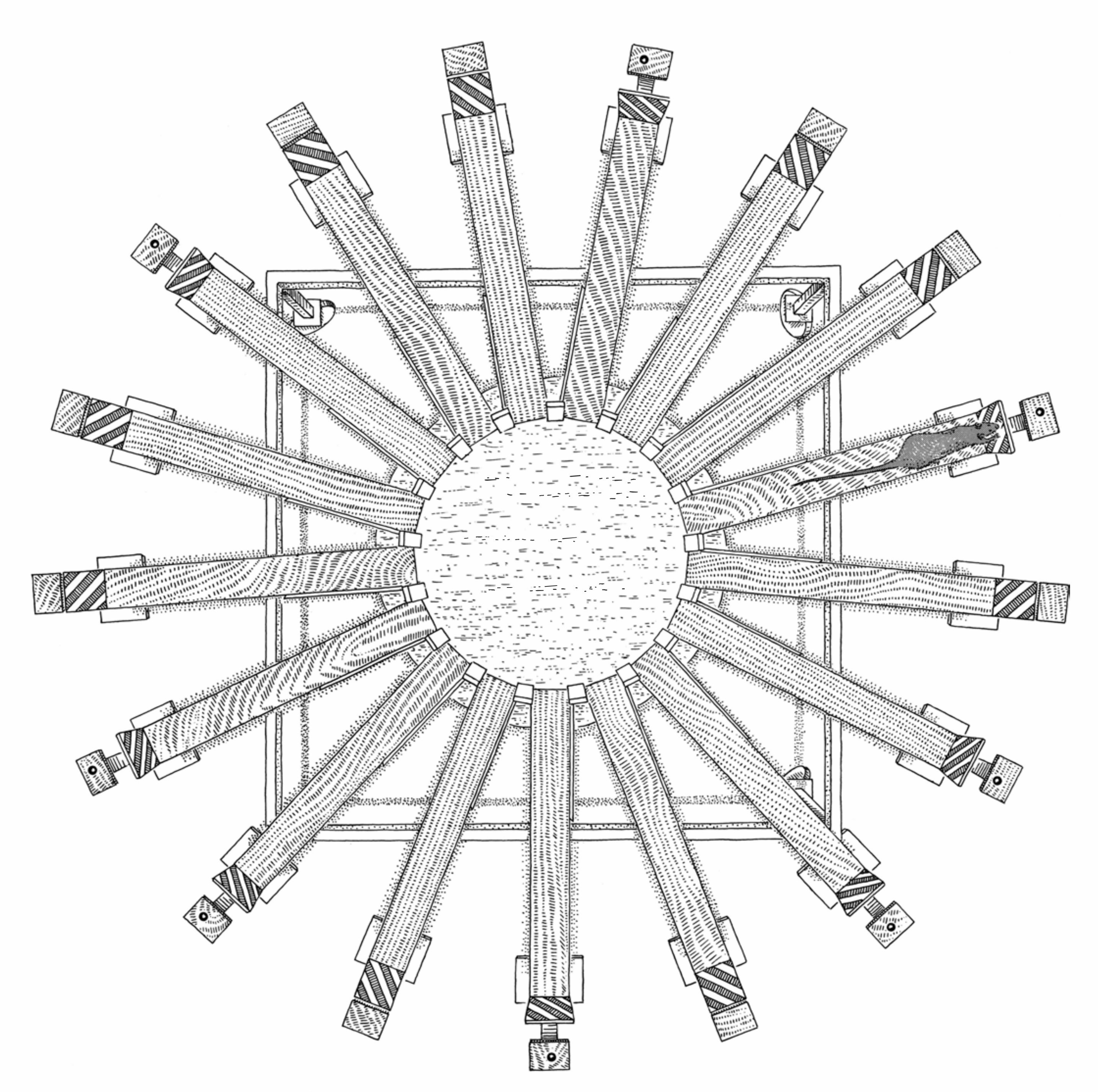
O'Keefe y Nadel han sugerido que se ha de atribuir al hipocampo la creación de un mapa espacial y que otras estructuras cerebrales son mediadoras en el aprendizaje de indicios. A fin de dar base a su opinión, montaron un experimento en el que examinaron dos grupos de ratas en un laberinto circular. Uno de los grupos fue entrenado en el uso de estímulos espaciales, tal como en nuestros experimentos habituales en laberintos radiales. Al otro se le dio un indicio bien explícito (una luz sobre una peana) que señalaba la ubicación de la comida. Se entrenó en ambas tareas a animales normales y a otros que sufrían lesiones hipocámpicas. Las lesiones del fórnix causaron el déficit de conducta esperado en el grupo que había aprendido a base de estímulos espaciales, pero tuvo poco efecto sobre el grupo que aprendió con la señal luminosa. Estos resultados sugerían que si pudiésemos modificar las tareas por realizar en el laberinto radial hasta hacer que fueran tareas de aprendizaje y no espaciales, los animales con lesión de fórnix no tendrían una ejecución peor que la de los animales normales.

Para verificar esta predicción, alteramos el laberinto de diecisiete brazos de manera que pudiera resolverse aprendiendo unos indicios. En la parte exterior del extremo de cada brazo instalamos un pequeño puente levadizo, que era una prolongación del brazo y podía alzarse o bajarse. La pastilla de comida se colocó en un pedestal situado más allá del extremo del brazo, por lo cual el animal tenía que cruzar el puente a fin de obtener la comida. Al principio de cada prueba se levantaba el puente de todos los brazos. Cuando el animal se introducía por uno de los brazos en busca de comida, empujaba el puente, haciéndolo bajar, lo cruzaba, se apoderaba de la comida y regresaba al centro. El puente permanecía bajado durante el resto de la prueba, de forma que la rata no tenía que recordar cada uno de los brazos elegidos, puesto que la posición del puente –alzado o bajado– funcionaba como indicio y guiaba sus elecciones correctamente. En el momento de decidir qué brazo iba a escoger en la siguiente contingencia de elección, la rata sólo tenía que mirar a lo largo de cada uno de los brazos: si el puente estaba alzado el animal sabía que debía escoger ese brazo.

Hasta ahora tan sólo poseemos datos preliminares obtenidos a partir de unos pocos animales, pero nuestros re-

sultados corroboran con fuerza las predicciones de O'Keefe y Nadel. Todas las ratas fueron entrenadas primero para responder correctamente, un grupo con puentes y el otro sin ellos. Luego se practicaron lesiones en el fórnix. En las ratas que pasaron la prueba espacial normal, sin puentes, se puso de manifiesto un grave deterioro posterior a las lesiones, no superando su actuación el nivel atribuible al azar, ni siquiera en la segunda elección. En cambio, las ratas lesionadas que pasaron la prueba con puentes mostraron, como máximo, un deterioro transitorio que pudo ser debido a los efectos de la operación en sí. Al cabo de pocos días no hubo errores en su conducta, escogiendo únicamente los brazos cuyo puente estaba alzado y evitando aquellos que lo tenían bajado. Estos resultados demuestran que los animales con lesión en el hipocampo sólo presentan un empeoramiento o deterioro de conducta en aquellas pruebas que pueden exigir el uso de la memoria espacial, pero no en todas las prueba realizadas en el laberinto radial. Cuando se da a estas ratas la oportunidad de seguir otra estrategia, basada en el aprendizaje de indicios, no les resulta difícil actuar tan bien como los animales normales.

Otra forma de abordar la relación entre las estructuras cerebrales y las funciones de conducta consiste en obtener registros de la actividad cerebral



SI SE AÑADEN PUENTES LEVADIZOS, el animal puede resolver satisfactoriamente el problema del laberinto de diecisiete brazos, sin tener que aprender un mapa cognoscitivo de su trazado en el espacio. Al comenzar una prueba, se levanta el puente situado al final de cada brazo y el animal debe empujarlo, bajarlo y cruzarlo para obtener la comida depositada en el pedestal del extremo. Desde entonces, el puente bajado actúa como indicio visual que informa al animal de que ya ha visitado ese brazo. Las ratas con lesión hipocámpica actúan mal en el laberinto convencional, pero actúan bien en éste. Ello sugiere que si bien el hipocampo es necesario para aprender un mapa cognoscitivo del entorno, otras regiones cerebrales intervienen en estrategias simples, las cuales permiten que el animal encuentre su camino aún sin saber dónde está.

mientras los animales están ocupados en la conducta pertinente. Si una estructura cerebral es importante para determinado tipo de conducta, la actividad eléctrica de las células nerviosas que constituyen la estructura debería estar correlacionada con dicha conducta.

James B. Ranck, Jr., del Donwnstate Medical Center, y O'Keefe, Nadel y sus colegas han logrado buena cantidad de información sobre los tipos de conducta correlacionados con la actividad nerviosa del hipocampo. Los descubrimientos de O'Keefe poseen una gran trascendencia con relación a nuestros experimentos en el laberinto: la actividad de algunas células hipocámpicas mantiene una estrecha correlación con la posición del animal en el espacio. O'Keefe llamó a estas células "unidades de lugar", con la intención de destacar el hecho de que su actividad dependía de la posición del animal en el aparato y no de la clase de conducta llevada a cabo por este mismo animal. La actividad del animal –comer, beber, asearse la piel, correr o permanecer quieto– no parecía importar desde el punto de vista de la célula. Mientras la rata se hallaba en un lugar determinado del aparato, la célula estaba activa; pero siempre que abandonaba este lugar, la célula pasaba al estado de reposo.

Como las ratas se sirven de estímulos espaciales para resolver el problema que les plantea el laberinto, decidimos buscar unidades de lugar en el hipocampo mientras los animales recorrían dicho recinto. En colaboración con Philip J. Best y Michael H. Branch, de la Universidad de Virginia, ensayamos la hipótesis de que las neuronas del hipocampo intervienen en la memoria espacial, para lo cual montamos una serie de experimentos neurofisiológicos. En primer término, entrenamos a los animales a ejecutar una tarea con refuerzo parcial en el laberinto radial, colocando comida al azar en los extremos de los brazos. Por consiguiente, la estrategia óptima era moverse continuamente por el recinto, inspeccionando el extremo de cada brazo para averiguar si en él se había repuesto la comida. Los animales aprendieron esta conducta con considerable rapidez, explorando regularmente todos los brazos del laberinto durante períodos de varias horas.

Valiéndonos de medios quirúrgicos, fijamos después una montura para microelectrodos al cráneo de cada uno de los animales. La montura, diseñada por Ranck, era muy liviana y no provocaba incomodidad ni interferencia alguna. Algunos días después de la operación, fijamos un electrodo de hilo de volframio a la montura y lo introdujimos en el cerebro. Todo el electrodo, salvo su punta de tres micrones (3 milésimas de milímetro) de longitud, estaba aislado, lo que permitía efectuar registros de células individuales. La inserción se realizó a ciegas: nos limitamos a introducir el electrodo en el hipocampo hasta que se detectaba la actividad de una célula única. Una vez terminado cada experimento de registro, provocábamos una lesión localizada, haciendo pasar una cantidad relativamente pequeña de corriente por la punta del electrodo. De este modo, pudimos luego identificar el área exacta que habíamos estado registrando, por medio de la división y corte del cerebro y el teñido de los tejidos.

Una vez localizada una célula del hipocampo, gracias al electrodo, se dejaba que la rata recorriera libremente el laberinto radial; mientras tanto, la actividad de la célula se registraba, amplificaba y proyectaba en una pantalla de osciloscopio. Comprobamos que muchas neuronas del hipocampo respondían selectivamente a determinados brazos del laberinto, ya fuera mediante un incremento de su ritmo de descarga al escoger la rata un brazo, ya mediante una abrupta disminución de dicho ritmo, por debajo del nivel promedio de actividad. Una neurona, por ejemplo, permanecía relativamente inactiva cuando el animal empezaba la prueba eligiendo el brazo 5, se tornaba muy activa al deslizarse por el 2 y el 3, remitía su actividad en los restantes brazos y se activaba de nuevo en el 2 y el 3.

Usando este sistema y llevando el registro de cada célula durante varias horas, clasificamos los brazos según estuvieran "encendidos" o "apagados". En este procedimiento seguimos el que se aplica generalmente a los campos receptivos de las neuronas situadas en las áreas auditivas y visuales de la corteza cerebral, para identificar los tipos de estímulos –visuales o auditivos– que modifican significativamente el ritmo de descarga de estas neuronas. En nuestros experimentos, un brazo "encendido" era aquel en relación con el cual la neurona se disparaba más rápidamente; uno "apagado" era aquel que ocasionaba el fenómeno contrario. Para que a un brazo se le pudiese considerar "encendido" o "apagado" debía cumplir dos requisitos: primero, que la tasa media de actividad cuando el animal se hallaba en el brazo tuviese, por lo menos, una magnitud igual a tres errores típicos de la media, por encima o por debajo de la media total de dicha tasa, puesto que la probabilidad de que se produzca al azar un cambio de esta magnitud en el ritmo de descarga es muy pequeña (dos por mil). El segundo requisito era que, cada vez que un animal entraba en un brazo, la tasa media de actividad respecto a éste fuese regularmente distinta de la tasa media total, para tener la seguridad de que el gran incremento o disminución del ritmo de descarga no era efecto del azar, sino que se mantenía estable durante un período de tiempo.

Por ejemplo: en una neurona de la que obtuvimos registros, los brazos 2 y 3 se ajustaron a los dos criterios expuestos de brazo "encendido"; los brazos 1, 4, 6, 7 y 8 a los dos criterios de brazo "apagado", mientras que el brazo 5 no cumplió ninguno de los dos. Por tanto, el campo receptivo de esta neurona dividía el laberinto radial en una pequeña zona "encendida" y otra más grande "apagada".

¿Cómo sabemos que el único correlato de conducta de la actividad de una célula hipocámpica es la posición del animal en el espacio? La respuesta es que no lo sabemos. Una de las dificultades que plantea cualquier experimento basado en registros es que los investigadores no tienen tiempo u oportunidad de interrogar a la célula con todos los tipos posibles de estímulos. Resumiendo, no se puede estar nunca seguro de si se ha encontrado el único correlato de conducta o campo receptivo de determinada célula del cerebro. No obstante, llevamos a cabo cierto número de pruebas a fin de dejar bien sentado que ningún factor no pertinente del experimento ejercía una influencia particular sobre la actividad de la célula. Distrajimos al animal de diversas maneras, cogiéndolo desde arriba, palmeando, haciendo centellear una luz y moviéndonos por la cámara experimental y la habitación adyacente; también alteramos sus expectativas de refuerzo, atrayéndolo a un brazo frente al cual se sostenía la comida con unas pinzas, colocando la comida en posiciones insólitas dentro del laberinto (por ejemplo en medio de un brazo), o poniéndola al final de un brazo después de que el animal hubiese inspeccionado el recipiente de la comida, encontrándolo vacío.

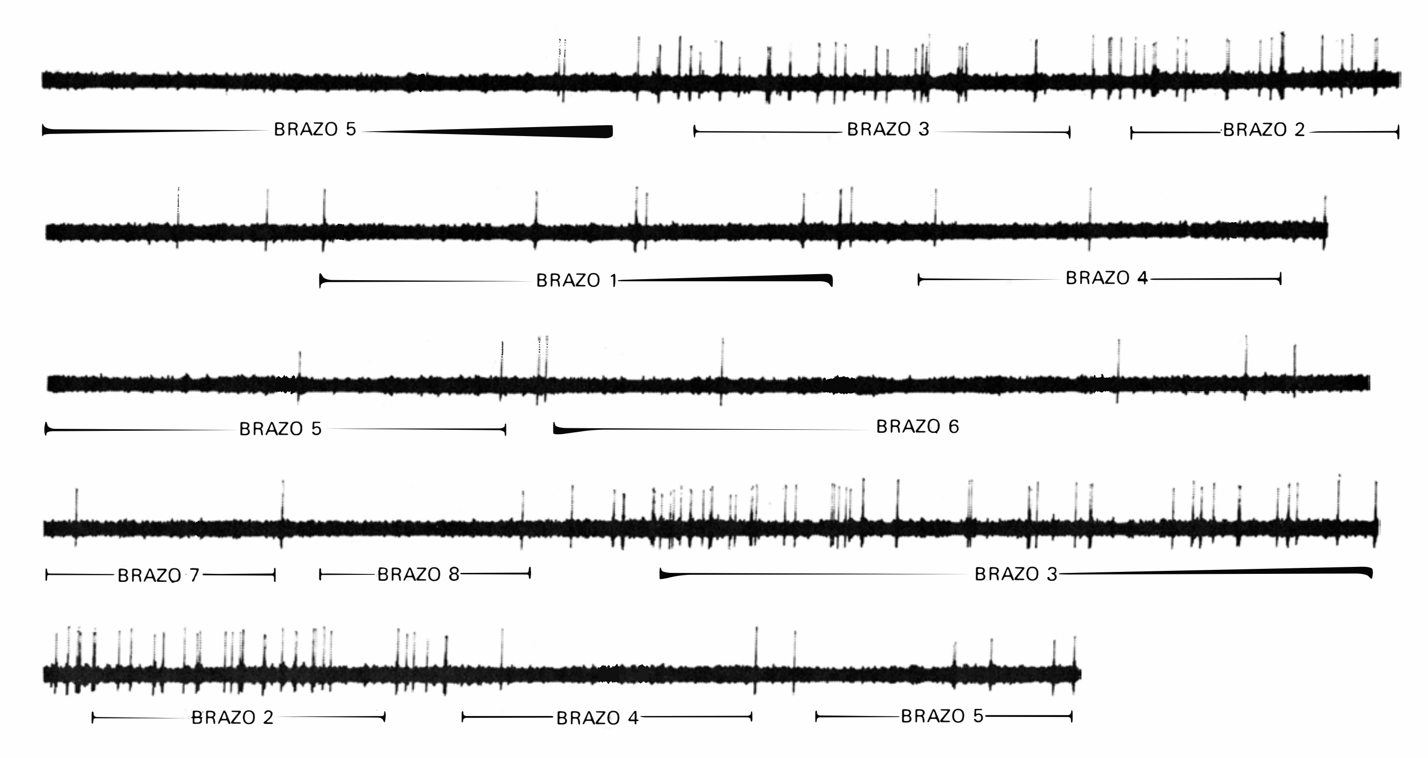
La actividad registrada en la célula se mantuvo estable a través de todas estas modificaciones; la única conducta que estaba evidentemente correlacionada con el nivel de actividad de la neurona era la posición del animal en el laberinto. Esto continuaba siendo cierto cuando la motivación general del animal cambiaba

al quedar saciado. Sus correrías aumentaban y disminuían cíclicamente con toda claridad; unas veces la rata respondía lentamente y se detenía para asearse la piel o descansar, mientras que otras realizaba las ocho elecciones en unos 30 segundos. Aún así, la actividad de las neuronas del hipocampo permanecía estable. Como control final, también utilizamos registros de neuronas situadas en otras estructuras cerebrales, no encontrando correlación alguna entre la ubicación espacial y el ritmo de descarga de las células. En pocas palabras: las neuronas del hipocampo de las cuales obtuvimos registros parecían funcionar como las unidades de lugar descritas por O'Keefe. La actividad de la célula se correlacionaba con la posición del animal en el laberinto, prescindiendo del tipo de conducta manifiesto entonces.

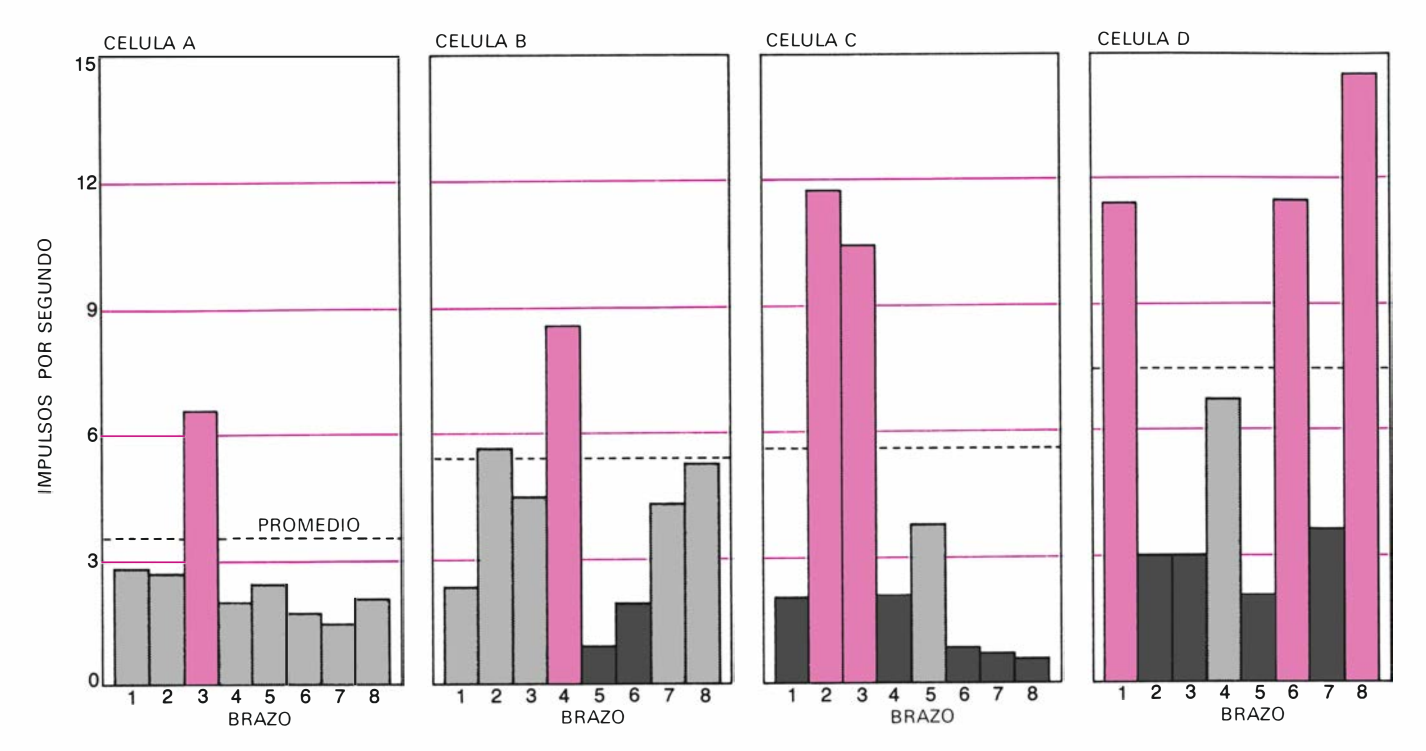
Los tipos de campos receptivos que hemos medido en las neuronas hipocámpicas van desde el más simple, que consta de un único brazo "encendido", hasta los más complejos, con brazos alternativamente "encendidos" y "apagados". Por lo que hemos visto hasta ahora, estos campos receptivos no encajan en ninguna categoría evidente, como sucede con los del sistema visual. Hay claras diferencias entre célula y célula, diferencias que residen en la tasa total de actividad, el número y discontinuidad de sus brazos "encendidos" y "apagados", y la magnitud del cambio del ritmo de descarga cuando la rata entra en un brazo. No obstante, para agrupar las células en categorías basadas sobre las mencionadas características de respuesta, hay que disponer de mayor información.

¿Cómo sabe la unidad espacial considerada en qué punto del espacio debe activarse? O'Keefe y sus colegas han abordado esta cuestión sometiendo los animales a pruebas en una cámara de paredes negras y débilmente iluminada. En cada una de las paredes se expuso un estímulo conspicuo: una luz, un ventilador, un altavoz emitiendo sonido y una tarjeta blanca, todos los cuales activaban conjuntamente la unidad de lugar. La supresión de uno cualquiera de los cuatro ejercía poco efecto sobre la actividad de la célula, porque seguramente los tres restantes hacían posible una orientación satisfactoria. Sin embargo, cuando se retiraban tres estímulos cualesquiera, el patrón de descarga de la célula se tornaba caprichoso e imprevisible. Estos hallazgos sugieren que las unidades de lugar reciben información de una constelación de estímulos espaciales del entorno y no sólo de un estímulo único. De esta manera, cada unidad de lugar reconoce una localización espacial en particular, efectuando una "triangulación" de los estímulos presentes en distintas partes del entorno, tal como los agrimensores y los navegantes determinan su situación en el espacio mediante la medición de las posiciones relativas de hitos fijos.

En nuestros experimentos se dedicó atención preferente a las unidades de lugar, pero también se ha descrito otro tipo de neuronas en el hipocampo. A partir de los trabajos de Case H. Vanderwolf, se sabe que cuando un animal está ocupado en una conducta voluntaria, como la de explorar o correr, su hipocampo exhibe un potencial eléctrico que varía rítmicamente y se llama ritmo zeta. Ranck identificó un grupo de células hipocámpicas cuya actividad mantenía estrecha correlación con este ritmo. Posteriormente O'Keefe y Black descubrieron que al entrenar ratas para el salto desde el suelo de la jaula hasta un pequeño estante, variando después la distancia entre ambos, la frecuencia de la descarga rítmica de estas células se relacionaba con la distancia que las ratas necesitaban salvar para llegar al estante. Al colocar pequeños pesos sobre el lomo de los animales, a fin de variar la magnitud de la fuerza exigida por el salto, la actividad de las neuronas no cambió, indicando así que la longitud del salto era la variable crítica. De acuerdo con esto, O'Keefe llamó a estas células de descarga rítmica "unidades de desplazamiento", puesto que su actividad dependía de la distancia que el animal estaba a punto de recorrer. Por consiguiente, parece que el hipocampo tiene, al menos, dos clases de células: unidades de lugar, las cuales reflejan dónde se encuentra el animal en un momento preciso, y unidades de desplazamiento, que reflejan la distancia que



EL TRAZADO DEL OSCILOSCOPIO muestra la actividad de una sola célula del hipocampo mientras la rata recorre libremente el laberinto radial. La actividad de la célula, registrada mediante la implantación de un electrodo metálico, se correlaciona con la posición de la rata en el espacio. Su ritmo de descarga es lento al elegir el animal el brazo 5, se acelera en el 2 y el 3, se retarda en otros y vuelve a aumentar en el 3.



ESTIMULOS ESPACIALES que excitan o inhiben las descargas de cuatro células prototípicas del hipocampo de la rata. Cada grupo de barras representa los ocho brazos del laberinto. Un brazo se califica como "encendido" *(en color)* **con respecto a una célula dada si, al penetrar el animal en él, el ritmo de descarga de la célula aumenta, por lo menos, tres errores típicos de la media por encima del ritmo medio total. Un brazo "apagado"** *(en gris oscuro)* **debe causar regularmente una disminución estable de la misma magnitud en el ritmo de descarga. Los brazos que no pertenecen a ninguna de las dos categorías se consideran neutrales** *(en gris claro)*. **Las respuestas de cada célula hipocámpica a la posición espacial varían mucho. La célula** *A* **posee un patrón simple de respuesta, con sólo un brazo "encendido"; en cambio, la** *D* **lo tiene de gran complejidad, con brazos alternativamente "encendidos" y "apagados". La célula** *B* **y la célula** *C* **son casos intermedios.**

está a punto de recorrer en el entorno.

En resumen, nuestros experimentos con lesiones cerebrales y registros de actividad neuronal sugieren que el hipocampo desempeña un papel importante en la memoria activa espacial y respaldan también la hipótesis del mapa espacial propuesta por O'Keefe y Nadel. Sin el hipocampo, la aptitud de las ratas para realizar correctamente la tarea exigida por el laberinto radial se ve gravemente menoscabada. Con el hipocampo intacto, las ratas se las arreglan bien y la actividad de las neuronas del hipocampo está estrechamente correlacionada con la posición de los animales en el espacio.

Tal como sucede a menudo con muchos experimentos, la información obtenida de los nuestros plantea ahora un cuadro de interrogantes enteramente nuevo. Algunas de ellas se relacionan con la actuación de los animales normales. ¿Por qué no adoptaron las ratas ninguna de las estrategias que hubieran hecho más fácil su tarea? ¿Fue debido a una limitación de los procesos cognoscitivos de los roedores, o a la excesiva facilidad de dicha tarea, la cual no representaba un reto suficiente? Otro tipo de interrogantes remite a las bases fisiológicas de la memoria activa espacial. De nuestros resultados parece desprenderse que el hipocampo juega un papel importante en ella, pero el fallecido Hans-Lukas Teuber del M.I.T., y Brenda A. Milner, del Montreal Neurological Institute, han sugerido que, al menos en el hombre, es posible que en la memoria espacial participen otras partes del cerebro, como sería el caso del lóbulo parietal. ¿Cuáles son los factores responsables de esta aparente discrepancia entre los mecanismos cerebrales de la memoria espacial de los roedores y del hombre?

Las investigaciones futuras deben considerar también la manera en que la organización celular del hipocampo le permite a éste almacenar la información espacial y recuperarla. Per Andersen, de la Universidad de Oslo, ha demostrado que el hipocampo contiene gran cantidad de circuitos, tan pequeños como complicados. Leonard E. Jarrard, de la Washington and Lee University, está examinando actualmente la función de tales circuitos, practicando lesiones discontinuas en el hipocampo, las cuales desorganizan selectivamente determinados circuitos. Este investigador ha descubierto que las lesiones en circuitos diferentes ejercen efectos marcadamente diferentes sobre la conducta; por ejemplo, existe una lesión en particular que parece desbaratar la adquisición de información espacial, pero no su retención.

Estos resultados sugieren que debe emprenderse un tipo más sutil de análisis anatómico y funcional para poder comprender el papel del hipocampo en la programación de la memoria espacial.

Por otra parte, la organización de las sinapsis que conectan el hipocampo al fórnix y al área entorrinal es otra tentadora prueba anatómica de que el hipocampo funciona como un sistema de memoria. Estas conexiones se distribuyen de forma regular desde el área frontal del hipocampo hasta la posterior y las vías correspondientes se cruzan en ángulo recto con otras del mismo hipocampo, de modo que se forma una red amplia y altamente estructurada. Esta disposición de las fibras nerviosas ha recordado a muchos el cruzamiento de los conductores en la memoria central de una computadora, cruzamiento que hace posible el almacenamiento de un "bit" de información en cada intersección de los mismos. Pese a que no es probable que el hipocampo almacene información de igual modo, su parecido estructural con la memoria de una computadora todavía hace surgir más interrogantes acerca de los mecanismos de la memoria en el cerebro.

Enseñanzas de la fibroplasia retrolental

Este tipo de ceguera fue epidémico entre los niños prematuros de los años 50. La manera en que resolvió el problema, por tanteos, es una parábola de las cuestiones que se suscitan en los experimentos en humanos

William Silverman

La forma de ceguera conocida como fibroplasia retrolental surgió repentinamente a principios de los años 40 entre recién nacidos, la mayoría de ellos prematuros, convirtiéndose muy pronto en epidemia. Es una ironía de la medicina el que la enfermedad se deba a los esfuerzos de los médicos por aumentar las posibilidades de los prematuros de sobrevivir con buena salud. Después de unos 12 años de investigaciones intensas y extensas, se descubrió la causa, y la enfermedad quedó prácticamente erradicada. El episodio completo merece evocarse ahora, por la nitidez con que presenta las dolorosas cuestiones que rodean a la experimentación con seres humanos y especialmente con recién nacidos.

La historia de la fibroplasia retrolental puede narrarse encuadrándola en la descripción que hizo el fisiólogo francés Claude Bernard sobre las etapas del desarrollo del conocimiento experimental: "En todo conocimiento experimental existen tres fases: una observación realizada, una comparación establecida y un juicio emitido". En el caso que nos ocupa, la primera fase comenzó el 14 de febrero de 1941, cuando Stewart H. Clifford, pediatra de Boston, hizo una visita domiciliaria de rutina para examinar una niña que había nacido prematuramente tres meses antes.

"Aunque el desarrollo general de la criatura era excelente", rememoraba Clifford hace poco, "me impresioné al notar un nystagmus inconstante (movimientos de sacudida de los ojos) y opacidades en los medios transparentes. Tuve que decir a la familia que temía que la niña no pudiese ver. Remití de inmediato la criatura a Paul A. Chandler, uno de nuestros mejores oftalmólogos."

Chandler examinó los ojos de la criatura y le dijo a Clifford que jamás había visto nada parecido. La ingresó en un hospital, en donde se le pudiese practicar una exploración ocular bajo anestesia, y consultó con Frederick H. Verhoeff, uno de los patólogos oculares más destacados del país. El examen reveló una membrana grisácea muy vascularizada, que parecía estar situada en la superficie posterior de cada uno de los cristalinos. El diagnóstico inicial fue fibrosis vascular de la cápsula del cristalino. Se pensó operar, pero se abandonó esta idea, pues Verhoeff opinó que el pronóstico era desfavorable.

Al cabo de una semana, Clifford vio su segundo caso de este mal cuando lo llamaron para examinar a un niño, superviviente de dos mellizos nacidos prematuramente en julio de 1940. (La hermanita gemela había muerto unas horas después de nacer.) Clifford llamó a Theodore L. Terry, oftalmólogo de Boston, quien diagnosticó cataratas congénitas, y dispuso lo necesario para ingresar al niño en un hospital para operarlo, pero poco antes de la hora fijada para la intervención, Clifford, Chandler y Verhoeff, presentes como consultantes, lo convencieron de no hacerlo por ser inoperable el trastorno ocular.

Hace poco se ha pasado revista a las historias clínicas de estos dos primeros casos. Los documentos muestran que a cada criatura, se le había sometido al tratamiento normal en aquel entonces para los prematuros, el cual incluía incubación en un ambiente muy rico en oxígeno. A juzgar por las historias clínicas quedó en claro que las alteraciones oculares vistas por Clifford en los niños fueron las que luego se conocieron con el nombre de fibroplasia retrolental, expresión tomada del latín y que significa formación de tejido fibroso detrás del cristalino. (La expresión fue inventada por Harry Messinger, oftalmólogo de Boston, quien, al decir de Chandler, era "un buen conocedor del latín y del griego, a quien a menudo se llamaba para poner nombre adecuado a diversas cosas".)

Pronto se hizo evidente que la enfermedad estaba muy difundida. En 1942, Terry publicó en el *American Journal of Ophthalmology* una relación de cinco casos que había conocido. En la nota incluyó dos frases proféticas: "En vista de estos hallazgos (el que los cinco niños hubiesen nacido prematuramente) quizá pueda preverse que esta complicación aparezca en cierto porcentaje de los prematuros. En tal caso, en la extrema prematuridad ha surgido algún nuevo factor que origina dicho estado".

Entre 1942 y 1945, Terry recopiló datos sobre 117 casos de esta anomalía. Solamente ocho de los casos se habían presentado en niños de los que se decía que habían nacido después de un embarazo de duración normal. Terry llegó a convencerse de que el cuadro se desarrollaba después del nacimiento, puesto que en tres prematuros cuyos ojos eran normales a la hora de nacer encontró después una fibroplasia retrolental bien establecida. A pesar de su opinión, hasta 1948 persistió la idea de que la enfermedad provenía de una anomalía ocular inherente o adquirida debida a factores

imperantes antes del nacimiento o, a más tardar, inmediatamente después del mismo.

En 1948, dos oculistas del Johns Hopkins Hospital (William C. Owens y Ella Owens) examinaron más de 100 prematuros al momento de nacer. Ninguno de ellos sufría de fibroplasia retrolental. La mitad de los niños fueron reexaminados mensualmente hasta los seis meses de edad; para entonces, en un 4 por ciento se había desarrollado la enfermedad. Este estudio mostró que las primeras anomalías comenzaban entre los dos y medio a tres y medio primeros meses después del parto, y consistían en cambios progresivos en los vasos de la retina. Este descubrimiento quedó rápidamente confirmado; en grandes centros de investigación en los que se estudiaba la enfermedad pronto llegó a ser un método rutinario realizar exámenes oftalmoscópicos de los ojos de todos los niños prematuros a intervalos semanales, con la esperanza de hacer un diagnóstico precoz de la fibroplasia retrolental.

Durante esos años, me encontraba en el Departamento de Pediatría del Colegio de Médicos y Cirujanos de la Universidad de Columbia; pertenecía también a la plantilla del hospital de niños del Medical Center-Columbia-Presbyterian. Un caso de fibroplasia retrolental en un prematuro que atendimos en 1950, ilustra el modo anecdótico y descontrolado que ha caracterizado gran parte de las in-



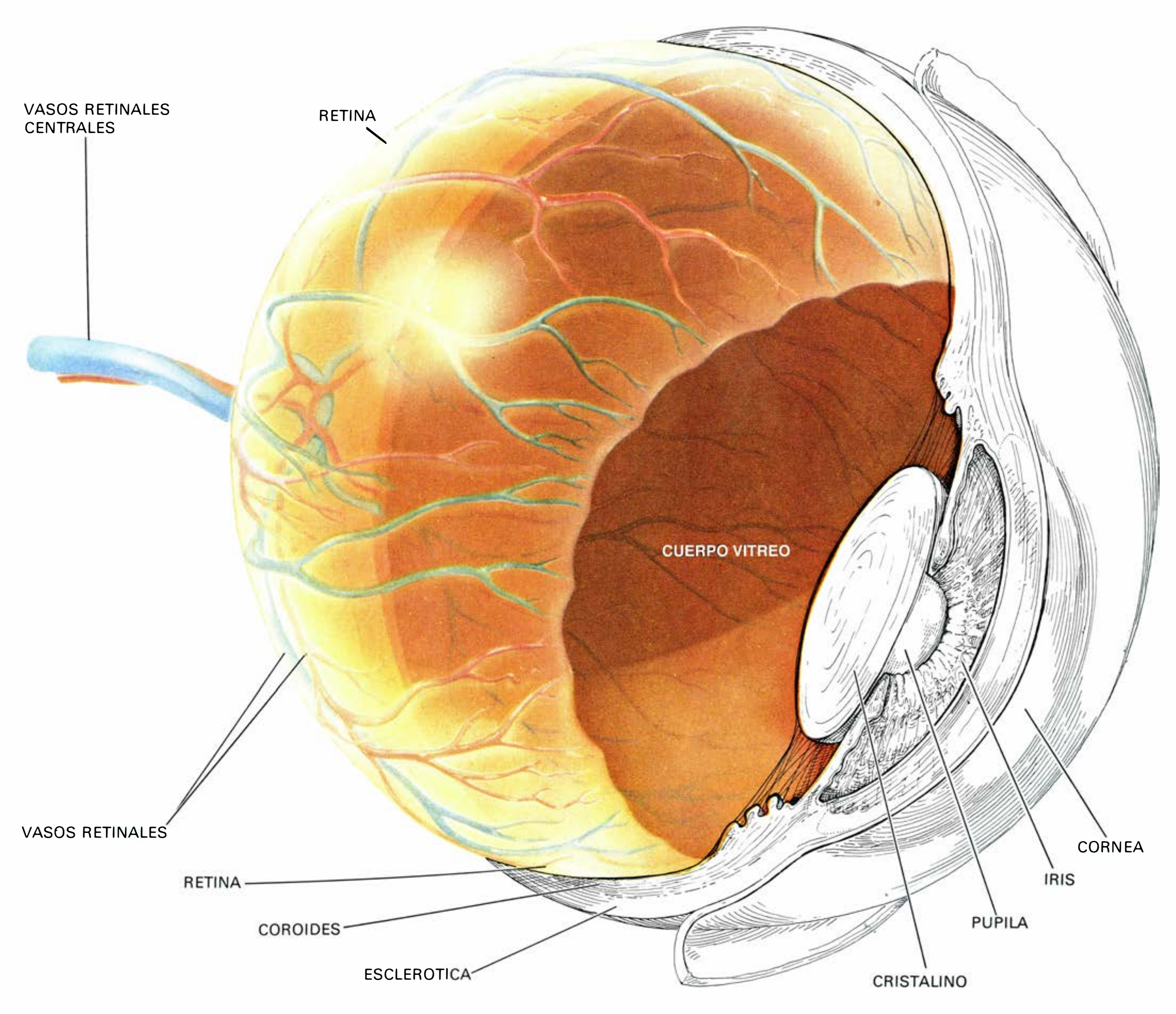
VISTA DE LA RETINA a través de un oftalmoscopio directo que muestra las anormalidades de los vasos sanguíneos características de la fibroplasia retrolental, en especial las curvas cerradas en muchas de las arterias. En la retina normal, las arterias son casi rectas. Estas fotografías muestran la retina de un adolescente que nació prematuramente y sufrió fibroplasia retrolental a consecuencia de la atmósfera rica en oxígeno que constituía entonces el tratamiento de norma para prematuros. El desorden no condujo a un deterioro de la visión.

vestigaciones clínicas. Al día siguiente de detectar los primeros síntomas de la enfermedad, escribí en la historia clínica del niño: "Es evidente que cualquier medida que se adopte para influir en el curso de la enfermedad debe iniciarse ahora. Debe mencionarse también que al menos se ha registrado un caso (Owens y Owens) en el cual estos cambios de... la retina (anormal tortuosidad venosa y prominencia desacostumbrada de los vasos sanguíneos) no han logrado, al parecer, continuar hasta la etapa de formación de la membrana fibroplástica retrolental y han involucionado hasta la normalidad. Se reconoce que esta es una posibilidad muy remota, pero el hecho de que haya sido observada hará igualmente incierta la interpretación del efecto beneficioso de cualquier medida terapéutica... Se ha decidido probar la administración del ACTH (hormona adrenocorticotrófica) basándose en que 1) es una enfermedad del tejido conjuntivo, 2) puede que los prematuros tengan deficiencia de ACTH y 3) ningún otro agente o régimen terapéutico ha dado indicio alguno de efecto beneficioso".

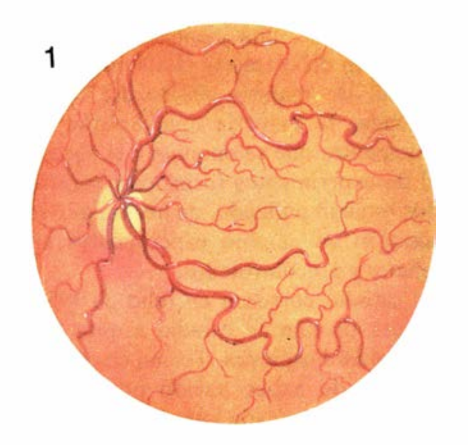
Se inició este tratamiento no intentado anteriormente. Mejoraron los cambios vasculares en los ojos, y por tanto se disminuyó la dosis. Los cambios empeoraron, tras lo cual se aumentó la dosis. Los ojos volvieron casi a la condición normal, y se suprimió el ACTH. El niño aumentó de peso y fue dado de alta.

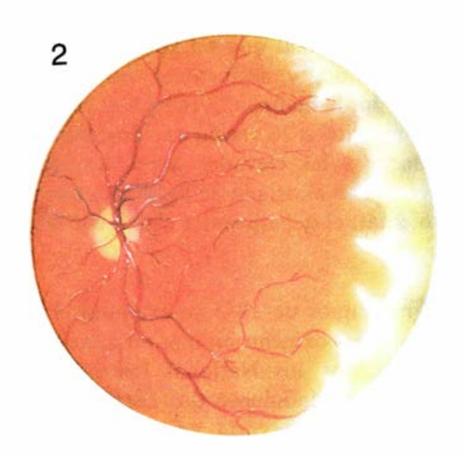
Poco después de esta dramática experiencia se trató con ACTH a 31 niños que estaban en el hospital antedicho y que mostraban los primeros cambios de fibroplasia retrolental. El permiso para intentar este método innovador se obtuvo de los padres del mismo modo informal como se había procedido pocos años antes, cuando otro medicamento "milagroso", la penicilina, se empleó para tratar infecciones mortales de varias clases. De los 31 niños, 25 salieron del hospital con ojos normales, dos quedaron ciegos, dos perdieron totalmente la visión de un ojo y dos prosiguieron con una visión útil y pequeñas cicatrices en la retina.

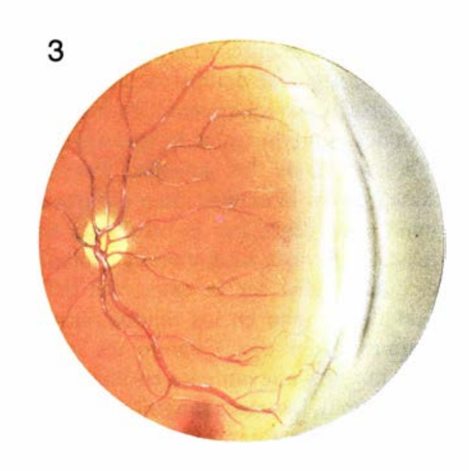
Estos resultados eran especialmente impresionantes al compararlos con los



OJO HUMANO NORMAL ilustrado en un diagrama que muestra la estructura de los vasos de la retina. Las arterias se muestran en rojo y las venas en azul. La retina se extiende en torno al globo ocular dentro de la coroides y de la esclerótica. Gran parte del globo ocular está ocupado con la estructura transparente conocida como humor vítreo. En el ojo normal los vasos retinales no abandonan la retina, pero en el crecimiento desordenado y tortuoso asociado con la fibroplasia retrolental los capilares suelen pasar a través de la retina y penetran en el cuerpo vítreo.







DESARROLLO DE LA FIBROPLASIA RETROLENTAL representada en una serie de dibujos basados en lo que se vio a través de una oftalmoscopiá directa. Los dibujos muestran parte del fondo del ojo izquierdo de un prematuro a la edad de cinco semanas *(1)*, **nueve semanas** *(2)* **y once semanas** *(3)*. **En el primer dibujo, los vasos retinales están gravemente dilatados y retorcidos. A las nueve semanas, ha empezado a formarse una hinchazón semilunar de la retina en el borde exterior izquierdo de la figura y la retina ha empezado a desprenderse. En el dibujo final el desprendimiento ha progresado hasta la etapa en que un pliegue,** *(línea curva cerca del borde derecho)*, **se ha desarrollado en la retina.**

de siete niños aquejados de fibroplasia retrolental incipiente y tratados en el Lincoln Hospital, de Nueva York, que no recibieron ACTH por no haber sido probada su eficacia. Seis de ellos quedaron ciegos. Parecía que el ACTH era el remedio para la enfermedad.

Sin embargo, nos dejaron intrigados dos niños (uno del Lincoln Hospital, y el segundo de otro hospital de Nueva York) cuyos cambios incipientes desaparecieron sin tratamiento y que quedaron con ojos normales. Parecía claro que un ensayo aleatorio y concurrente controlado (en el cual un grupo de pacientes continuaba recibiendo el tratamiento normal y otro grupo recibía el nuevo tratamiento propuesto, asignando un paciente a uno u otro grupo estrictamente al azar) sería la única manera de decidir si el ACTH resultaba o no eficaz.

Se realizó dicho ensayo. Alrededor de un tercio de los niños que recibieron ACTH quedaron ciegos, mientras sólo ocurrió igual cosa con un quinto de los niños del grupo de control. Además, hubo más muertes en el grupo tratado con ACTH. Dos años más tarde, William Owens publicó la observación de que aproximadamente tres cuartas partes de los niños que mostraban los primeros cambios de la fibroplasia retrolental volvían espontáneamente a la normalidad. Eso fue exactamente lo que observamos en Nueva York durante el tratamiento con ACTH.

Se postularon más de 50 causas diferentes de fibroplasia retrolental. Se examinó formalmente alrededor de la mitad de ellos; sólo cuatro fueron sometidos a prueba mediante ensayos clínicos experimentales prospectivos. Gradualmente, conforme se iban acumulando las pruebas clínicas, la atención se fue centrando en el medio ambiente rico en oxígeno, que se proporcionaba de manera rutinaria a los niños prematuros, como factor causal de la fibroplasia retrolental. Mirado retrospectivamente, es significativo el que una cuestión que se debatiese con pasión a comienzos de la década de 1950 fuera si el factor causal se debía a un exceso de oxígeno o una falta de oxígeno en las retinas de los niños. Dos médicos, Kate Campbell, de Australia, y Mery Crosse, de Inglaterra, a las que se había atribuido el descubrimiento de la causa de la enfermedad, publicaron pruebas anecdóticas que echaban la culpa a un exceso de oxígeno en observaciones realizadas en una población de 142 niños. En París existía la opinión contraria (basada en observaciones realizadas en 479 niños). En el Charity Hospital de Nueva Orleans, que poseía la mayor unidad para cuidado de niños prematuros de los Estados Unidos, no se habían observado casos de fibroplasia retrolental, a pesar de que allí se administraba oxígeno de manera rutinaria y continua.

Norman Ashton, del Instituto de Oftalmología de la Universidad de Londres, propuso la hipótesis de que la enfermedad traía consigo un crecimiento excesivo y anormal de los vasos sanguíneos de la retina en vías de desarrollo. Había pruebas indirectas que sugerían que el estímulo normal que atrae vasos sanguíneos hacia la retina fetal era una demanda de oxígeno que se suscitaba en las capas internas de esa parte del ojo en el cuarto mes de gestación. Esta opinión provenía del trabajo del oftalmólogo israelita I. C. Michaelson sobre el desarrollo de la retina en varias especies, incluido en el hombre.

Michaelson había inyectado tinta china en el sistema arterial del ojo de fetos humanos en la autopsia y luego había realizado preparaciones histológicas de la retina. Uno de sus descubrimientos principales consistía en que los capilares brotaban de las venas, apartándose de las arterias repletas de oxígeno, dejando una zona exenta de capilares. Investigaciones ulteriores mostraron que cuando se criaba animales en un ambiente que simulaba una gran altitud, en una atmósfera con un contenido de oxígeno menor que el normal, la zona exenta de capilares se hacía más estrecha. Aunque la importancia de estas observaciones respecto de la fibroplasia retrolental pasó prácticamente inadvertida durante varios años, este descubrimiento apoyó la hipótesis ulterior de Ashton respecto de que la enfermedad venía ocasionada primariamente por una grave carencia de oxígeno en las capas retinales profundas del ojo en desarrollo.

Ashton atacó el problema armado con el conocimiento de que el gato recién nacido tenía una retina no completamente vascularizada, comparable a grandes rasgos a la retina humana alrededor del séptimo mes de gestación. Ashton y sus colaboradores pusieron un gato y tres gatitos en una atmósfera enriquecida en oxígeno. El primer experimento mostró que, después de cuatro días de exposición continua a una atmósfera que contenía entre un 75 y un 80 por ciento de oxígeno, los vasos sanguíneos retinales en crecimiento se atenua-

ban completamente. El efecto inicial del oxígeno, según se demostró, consistía en un notorio estrechamiento de los vasos retinales inmaduros, a lo que seguía la obliteración de los mismos. Paradójicamente, era la exposición a ese elevado nivel de oxígeno, con la resultante erradicación de vasos sanguíneos germinales, lo que parecía ser la causa del déficit final de oxígeno en los tejidos retinales profundos del ojo. Cuando los gatitos eran puestos nuevamente en una atmósfera normal, los vasos sanguíneos crecían de manera desorganizada, produciéndose un retoñar de nuevos capilares que salían del área retinal normal adentrándose en el cuerpo vítreo.

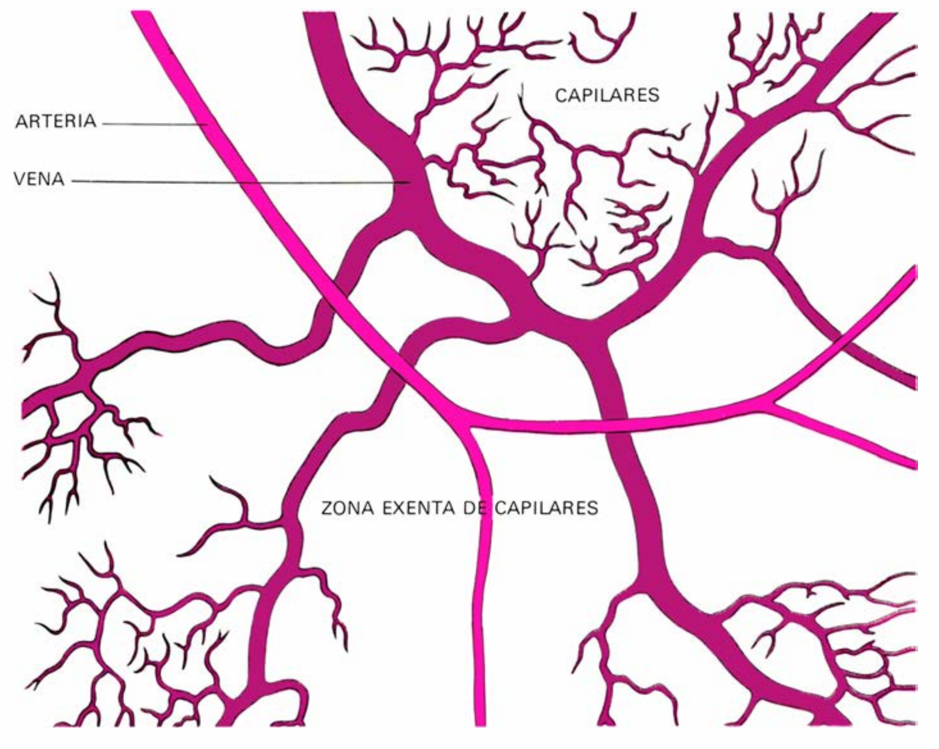
En el Hospital Municipal Gallinger de Washington, Arnall Patz, oftalmólogo residente, ideó un test en el cual, a ciertos niños prematuros colocados en incubadora, se les daría menos oxígeno suplementario que el que solía darse en ese tiempo. Ese estudio resultó ser un ensayo difícil para los investigadores. Según lo recuerda Patz: "Las enfermeras estaban convencidas de que íbamos a matar a los niños del grupo al que se mantenía con menos oxígeno; por la noche, algunas de las enfermeras de más edad solían abrir la válvula de oxígeno para un niño al que no se le estaba administrando, y cerrarla al terminar su turno por la mañana". Aunque el ensayo, circunscrito a 76 recién nacidos, parecía achacar a las elevadas concentraciones de oxígeno el origen de la fibroplasia retrolental, el debate sobre el oxígeno continuó.

A principios de 1953 se examinó el tema del oxígeno en una reunión convocada por los National Institutes of Health. Se definieron dos corrientes de opinión. La mayoría pensaba que debían llevarse a cabo simultáneamente en varios centros médicos unos ensayos formales y controlados. Una minoría, argumentando que ya había suficientes pruebas observacionales como para incriminar al oxígeno, se oponía a los ensayos por estimarlos inmorales. La disputa reflejaba un problema deontológico fundamental, que Bernard había descrito cien años antes: "Muchos médicos atacan a la experimentación en seres humanos por creer que la medicina debería ser una ciencia de observación, pero los médicos hacen cada día experimentos terapéuticos en sus pacientes, de modo que esta contradicción no puede resistir un análisis cuidadoso. La medicina es, por naturaleza, una ciencia experimental, si bien debe aplicar el método experimental de manera sistemática". Resumiendo, la mayoría opinaba que los participantes que se oponían a la necesidad de experimentos formales y controlados estaban pidiendo, de hecho, que se realizaran en cambio experimentos informales y no controlados.

El estudio comenzó en julio de 1953. Durante un año se estudió a unos 800 niños en 18 hospitales. Tenían en común el hecho de haber nacido prematuramente y de que cada uno de ellos había pesado 1,5 kilogramos o menos al nacer. Durante los tres primeros meses se escogió grupos aleatorios de tres. A dos niños de cada grupo se les asignó a un grupo que recibía oxígeno suplementario sólo cuando los indicios clínicos así lo requerían y, en tal caso, con una concentración de no más del 50 por ciento; el tercer niño recibió lo que en aquel entonces era el tratamiento de rutina, consistente en administrar continuamente oxígeno a una concentración de más del 50 por ciento durante 28 días. Durante los nueve meses restantes del ensayo, todos los niños recibieron solamente una dosis disminuida de oxígeno.

Los resultados fueron impresionantes. La fibroplasia retrolental apareció en un 23 por ciento de los niños del grupo oxigenado de la manera habitual, y en un 7 por ciento del grupo que recibió concentraciones disminuidas de oxígeno. (Este último resultado es un detalle del ensayo que rara vez se recuerda y que merece ser destacado. No todos los recién nacidos que recibieron oxígeno "disminuido" según las normas de la época escaparon de la enfermedad.) El estudio mostró, asimismo, que el riesgo de contraer la enfermedad aumentaba con cada día que el niño pasara en una atmósfera en la que hubiese una concentración de oxígeno superior al 50 por ciento, hasta alcanzar las dos semanas de exposición; a partir de entonces dicho riesgo quedaba equilibrado.

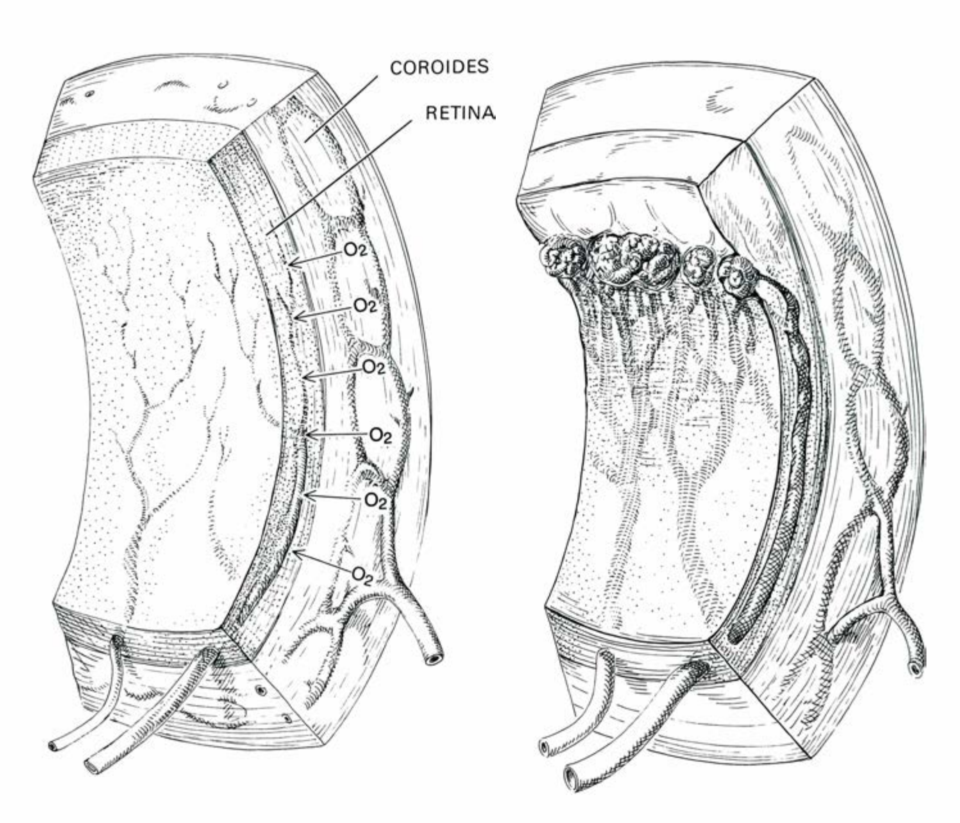
El estudio y los resultados del mismo representaron las etapas segunda y tercera mencionadas por Bernard, "una comparación establecida y un juicio emitido". Los resultados se anunciaron en la reunión anual de la Academia de Oftalmología y Otorrinolaringología de los Estados Unidos en 1954. El anuncio recibió publicidad amplia e inmediata. En el plazo de un año se modificó sustancialmente la práctica consistente en administrar una elevada concentración de oxígeno a los niños prematuros. La enfermedad



EL DESARROLLO DE LOS VASOS sanguíneos fue estudiado por I. C. Michaelson, oftalmólogo israelita, quien halló que normalmente los capilares brotan de las venas y tienden a apartarse de las zonas que rodean las arterias. Al criar animales experimentales en un ambiente con escaso oxígeno, la zona exenta de capilares se hacía más angosta. Este descubrimiento respaldaba la hipótesis de que la demanda de oxígeno en la retina hacía que los vasos proliferasen y que por tanto la causa de la fibroplasia retrolental era de una carencia de oxígeno. Después se demostró que el déficit de oxígeno en la retina se debía a una respiración sostenida de altas concentraciones.

desapareció con la misma rapidez con que había aparecido.

Para entonces se hacía evidente que el motivo de la súbita aparición de la enfermedad se relacionaba con la aceptación general de una hipótesis (formulada a principios de los años 40) respecto de que el elevado porcentaje de lesiones cerebrales en niños prematuros era ocasionada por una falta de oxígeno que hasta entonces no se había reconocido. Esta opinión constituía el fundamento lógico para la administración continua de una elevada concentración de oxígeno, incluso a recién nacidos que no mostraban síntomas anormales. Al finalizar la segunda guerra mundial se proyectaron y construyeron incubadoras que satisficieran las nuevas especificaciones de los médicos respecto de proporcionar oxígeno a elevadas concentraciones.



EL EFECTO DEL OXIGENO en la retina infantil consiste primero *(izquierda)* en hacer que los vasos sanguíneos en desarrollo se estrechen hasta llegar a obliterarse. Las flechas indican una mayor difusión de oxígeno desde los vasos hasta la capa coroidal adyacente; estos canales no quedan apreciablemente afectados. Más tarde, los vasos debilitados de la retina vuelven a crecer desordenadamente *(derecha)*, penetrando a través de la superficie retinal hasta llegar al cuerpo vítreo. Estos efectos se presentan sólo en retinas desarrolladas de modo incompleto, motivo por el cual la fibroplastia retrolental afectó principalmente a prematuros que habían estado expuestos, durante varios días, a elevadas concentraciones de oxígeno en incubadoras del hospital infantil.

A una concentración elevada, el oxígeno puede ser tóxico como resultó serlo para el desarrollo de los vasos sanguíneos de la retina del niño prematuro. Traía por resultado la fibroplasia retrolental porque los vasos retinales en desarrollo se marchitaban. Luego había un nuevo y desordenado crecimiento de esos vasos. Aunque este proceso proliferativo solía declinar, dejando una retina normal, en un pequeño número de casos se producían extensas hemorragias y se formaba tejido cicatrizal fibroso, haciendo que la retina se despegase de su posición normal y se hinchase haciendo presión contra la parte posterior del cristalino.

Desde el punto de vista médico, el relato parecía estar completo y el interés en esta enfermedad disminuyó rápidamente, conforme se convirtió en una de las complicaciones menos frecuentes del nacimiento prematuro. De hecho, muchas de las cuestiones planteadas por la experiencia habida con la fibroplasia retrolental no habían sido abordadas aún. Ahora, veintitantos años más tarde, quedan pendientes varias interrogantes cruciales.

El primer signo inquietante comenzó cinco años después del estudio cooperativo. Mery Ellen Avery y Ella H. Oppenheimer, de la Escuela de Medicina de Johns Hopkins, informaron que la frecuencia de muertes por enfermedad de la membrana hialina era mayor entre los niños en el hospital universitario de lo que había sido durante un período de cinco años anterior a 1954, cuando el oxígeno se administró liberalmente a los niños prematuros. En 1963, Alison D. McDonald del Guy's Hospital, de Londres, informó acerca de la experiencia de 19 centros para recién nacidos, de Inglaterra y Gales, antes y después del uso restringido de oxígeno. Esta investigadora descubrió que al aumentar el tratamiento con oxígeno se incrementaba la frecuencia de la fibroplasia retrolental, pero disminuía el índice de diplejía espástica (parálisis espasmódica de las extremidades inferiores).

Kenneth W. Cross de la Facultad de Medicina de Londres examinó hace poco la tendencia en el índice de mortalidad de recién nacidos en Inglaterra y Gales a lo largo de los últimos cuarenta años. Halló una disminución exponencial pareja en el índice de mortalidad durante los días 1 a 6 después del nacimiento, pero la curva para el índice de mortalidad en el día del nacimiento (día cero) mostraba un quiebro sesgado en la tendencia decreciente, especialmente en niños que pesaban poco al nacer. La misma anomalía se observó en datos de los Estados Unidos. El quiebro correspondía estrechamente con el inicio de las restricciones de la oxigenoterapia para recién nacidos.

Cross calculó el número de muertes adicionales por año producidas después de adoptarse la política restrictiva, restando el número de muertes previstas (cifra que se obtiene extrapolando la curva pareja anterior a la disminución de la oxigenoterapia) del número de muertes que habían realmente ocurrido. Esta cantidad adicional era de unas 700 muertes anuales. Dividiendo esta cifra por un número que representaba la disminución en el número de cegueras ocasionadas por fibroplasia retrolental, Cross calculó que durante los años de menor administración de oxígeno, por cada niño que no quedó ciego murieron otros 16. (El estudio no tomó en cuenta el hecho de que el quiebro en la curva coincidía también con la introducción de ciertas medicinas para impedir y tratar la infección, substancias que, según se demostró después, eran peligrosas para los prematuros.)

Es posible preguntarse por qué el estudio cooperativo realizado en Estados Unidos no logró descubrir el riesgo de que una oxigenoterapia restringida pudiese aumentar el índice de mortalidad en ciertos niños. Este descuido perturbador guarda relación con una desvia-

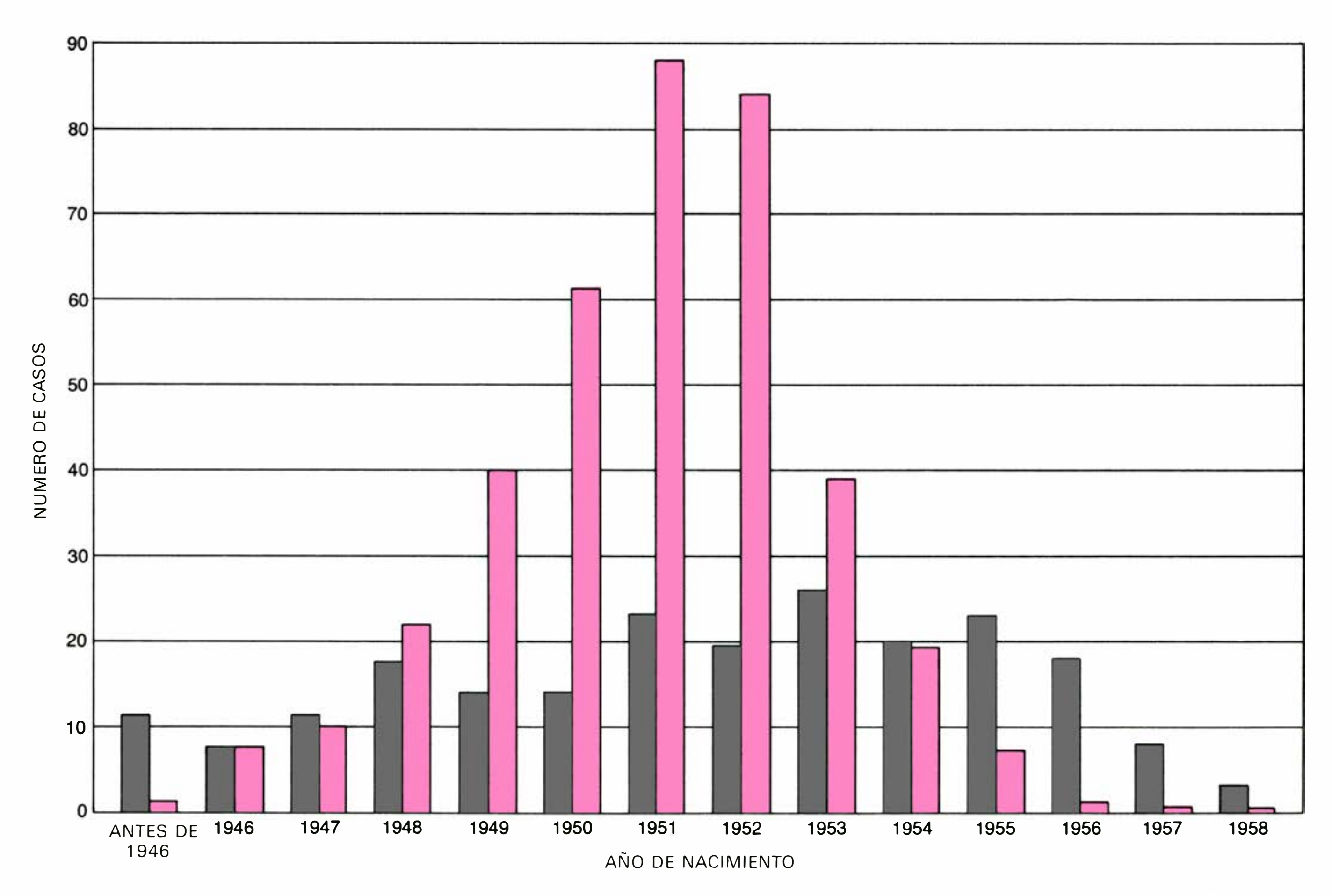
ción deliberada de la planificación original del estudio. A los niños no se les incorporaba al ensayo sino hasta que habían sobrevivido durante 48 horas. El motivo para hacer esto era que la mayoría de las muertes de prematuros se producen en los dos primeros días de vida; se argumentó que la inclusión de estas muertes precoces no ayudaría a dar respuesta a la cuestión del daño ocasionado por el oxígeno a los vasos retinales. Esa estrategia tenía también la ventaja de aplacar a las enfermeras, la mayoría de las cuales eran muy contrarias a la política de restringir el oxígeno. Pasó cierto tiempo antes que se llegara a cierto equilibrio (que no es aún el ideal) por el cual los niños prematuros que necesitan oxígeno suplementario para sobrevivir sin lesiones cerebrales lo reciben, pero en concentraciones que no parecen originar la ceguera.

El éxito de los empeños por resolver el rompecabezas de la fibroplasia retrolental tuvo mucho que ver con el gran aumento de los fondos asignados por el Congreso de los Estados Unidos para investigaciones médicas, aumento que se inició a fines de la década (1950-1959). Gran parte de la investigación estuvo dirigida hacia problemas que afectan al feto y al recién nacido, con fructuosos resultados tanto para la biología como para la medicina. A pesar de los progresos logrados en todas las ramas de la medicina, que por primera vez han sacado a la profesión del ámbito de la mafia, se observa una amplia erosión de la confianza del público en la profesión médica.

La medicina perinatal, que aborda los desórdenes del niño durante el período que abarca desde poco antes hasta poco después de nacer, puede servir de ejemplo. La naturaleza del problema, según lo ha expresado Howard Brody, de la Universidad del Estado de Michigan, es que "los científicos y clínicos son proclives al error cuando confunden los problemas científicos con los problemas de valor e intentan resolver éstos con herramientas de aquéllos". Conforme se ha ido ahondando en el conocimiento de los desórdenes perinatales, los médicos han salido con demasiada frecuencia de sus laboratorios para aconsejar tratamientos que ni han sido plenamente comprobados ni se han presentado al estudio y a la aprobación de la comunidad. Por nobles que puedan parecer los objetivos de estos médicos, han sido un estorbo tanto para la práctica como para la ciencia de la medicina perinatal.

El filósofo Kurt von Fritz observa que "no hay criterios absolutos mediante los cuales pueda juzgarse objetivamente el sistema de valores de una sociedad". Yo voy más allá: no hay criterios absolutos mediante los cuales pueda juzgarse con completa objetividad los valores de un individuo. A consecuencia de esto, la evaluación del riesgo *versus* el beneficio en todas las intervenciones médicas (ya sean probadas o experimentales) es un proceso difícil e individualizado, especialmente en la sociedad pluralista de los Estados Unidos.

El finado Henry K. Beecher, de la Facultad de Medicina de Harvard, clasificaba todos los experimentos en seres humanos en grupos que se han resumido en dos categorías mutuamente excluyentes: terapéuticos y no terapéuticos. Su clasificación se basaba en la intención



SUBIDA Y DECADENCIA de la fibroplastia retrolental, observable en este gráfico de la ceguera entre niños de California meridional. El gráfico muestra el número de casos de ceguera imputables a fibroplasia retrolental *(en color)* y a otras causas *(gris)*. Con el tiempo se descubrió que la aparición de la fibroplasia retrolental se debía a la política de administrar grandes cantidades de oxígeno para impedir lesiones cerebrales en los prematuros. Las lesiones cerebrales se deben a una falta de oxígeno que es difícil de reconocer. A fines de la segunda guerra mundial las incubadoras se proyectaron de modo que fuese factible administrar una elevada concentración de oxígeno a los prematuros.

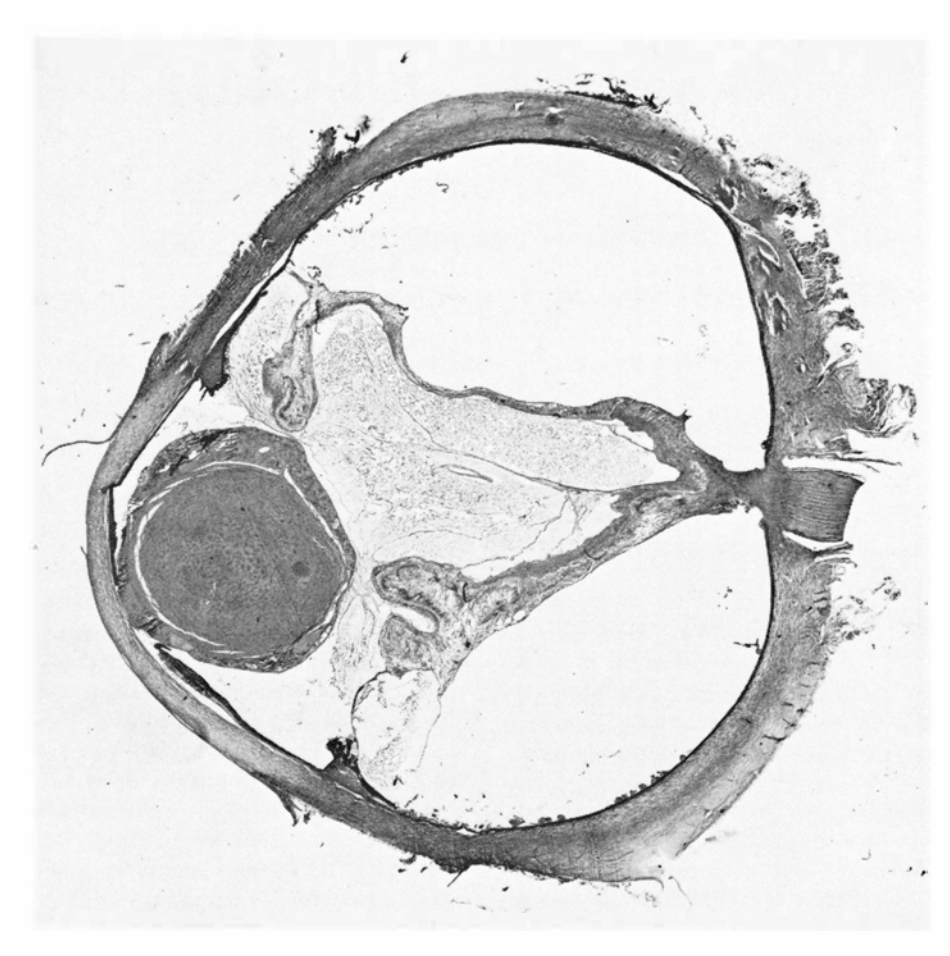
del experimentador y no en el riesgo. Prácticamente todos han aceptado sin críticas dicha clasificación.

Sin embargo, el punto de vista científico acerca del mundo es probabilístico: el riesgo y el beneficio son relativos, no absolutos. Deberían valorarse en lo que podría denominarse una perspectiva de sistemas, en la cual se ponderaría unas categorías de riesgo y de beneficio. El mayor peso se asignaría ordinariamente al riesgo y al beneficio que afectasen al individuo (o a la unidad madre-niño mientras el recién nacido es todavía un lactante), dándose progresivamente menos peso a la familia, la comunidad, la insuficiencia cultural, etc.

El debate actual acerca del consentimiento, con conocimiento de causa, para la experimentación en el feto y en el recién nacido permanece abierto. Las interpretaciones de la relación entre riesgo y beneficio y de la categoría social de estos individuos son juicios de valor que diferentes subculturas de la sociedad decidirán de manera diferente. Imponer a todos la propia solución es inmoral.

El gobierno federal norteamericano ha impuesto restricciones sobre las investigaciones "no terapéuticas" que afecten al feto humano y a los lactantes. A mi modo de ver, esta situación es lamentable. La profusión de nuevos medicamentos, los adelantos en la práctica médica y la preocupación acerca de los expertos de los factores ambientales sobre la salud, han hecho de ésta una época en que se precisa más bien más que menos experimentación en humanos, incluso en niños. Los experimentos deberían planificarse escrupulosamente y rodearse de todo tipo de funciones. Por desgracia, no siempre se observan esas condiciones en los experimentos modernos, que, con frecuencia, ni siquiera son reconocidos como tales. Lamentablemente la profesión médica ha tenido su parte en la creación de tal situación.

En 1967, un senador del estado de Nueva York atrajo ampliamente la atención pública al afirmar que en los hospitales municipales de la ciudad de Nueva York se estaban llevando a cabo bárbaros experimentos con niños. Presentó un borrador de legislación para prohibir toda experimentación con infantes. La profesión médica respondió con una propuesta de legislación que permitiese las investigaciones clínicas cuidadosamente controladas que afectaran a niños. El senador abandonó su ataque, al parecer porque ya no excitaba el interés del público, y la profesión médica, al darse cuenta del mismo fenómeno, dejó también de lado el tema. Los sucesos subsiguientes, que culminaron en las restricciones actuales, indican cuán errado era no seguir adelante de una manera más responsable entonces.



ETAPA AVANZADA de fibroplasia retrolental ilustrada en esta fotografía de una sección transversal horizontal de un ojo. El cristalino es la estructura ovalada de la izquierda, y la masa gris inmediata es la retina, que se ha desprendido. Se creyó que la fibroplasia retrolental era una enfermedad del cristalino a causa del tejido fibroso grisáceo que se halla detrás de él en los casos graves.

La amenaza presentada en 1967 tuvo el efecto de alentar los estudios extralegales: experimentos que no eran ni formales ni informales; evitaba así la preocupación sobre el consentimiento con conocimiento de causa y las revisiones estrictas. Mediante el simple truco de poner a los tratamientos innovadores el rótulo de "no experimental" sino tan sólo "modificaciones o evolución de la práctica existente" y, "basados en sólidos principios fisiológicos", los investigadores han procedido a utilizar una nueva terapéutica. En estos ensayos anecdóticos se ha hecho caso omiso de las reglas respecto de las pruebas necesarias para la investigación científica.

Así pues, el método de tanteo que condujo al episodio de la fibroplasia retrolental se está repitiendo en amplia escala. Esta estrategia de estudios empíricos análogos de la ruleta está condonada e incluso ampliamente elogiada, mientras que a los empeños por someter a prueba nuevos tratamientos con ensayos clínicos aleatorios y controlados que ponen límites al riesgo se les caracteriza como "osados". En un reciente comentario hecho por un médico académico se describía así el método de ensayos controlados: "cómodo en todos los casos, pero probablemente no muy eficaz de valorar la terapéutica que puede depender de una gran cantidad de variable". En la situación actual de restricciones mal concebidas y de experimentos de contrabando, ocurre como si más de 10.000 niños no hubiesen quedado ciegos a causa de la fibroplasia retrolental, como si las palabras de Bernard no se hubiesen pronunciado jamás, como si R. A. Fisher jamás hubiese elaborado el enfoque aleatorio del problema de variables múltiples y como si A. Bradford Hill jamás hubiese perfeccionado el formato para los ensayos clínicos controlados.

Lectinas

Estas proteínas se encuentran en las plantas y se unen específicamente a los azúcares de las membranas celulares, ligando a las células entre sí. Son elementos clave para comprender la función de la superficie celular

Nathan Sharon

El comportamiento social de la célula viva –que comprende la comunicación intercelular, la regulación del crecimiento y de la diferenciación, la respuesta inmune y quizá también la aparición de tumores malignos– está mediado principalmente por la superficie de la célula y, más concretamente, por las moléculas de azúcar ramificadas, de las que está tachonada toda la superficie celular. El que hayamos reconocido recientemente estos hechos y el que nuestra comprensión de la arquitectura y de la función de la superficie celular vaya día a día en aumento se debe, en gran parte, a un tipo de proteínas llamadas lectinas, que se ligan a moléculas de azúcar, formando uniones muy similares a las de los enzimas con sus sustratos y a las de los anticuerpos con sus antígenos.

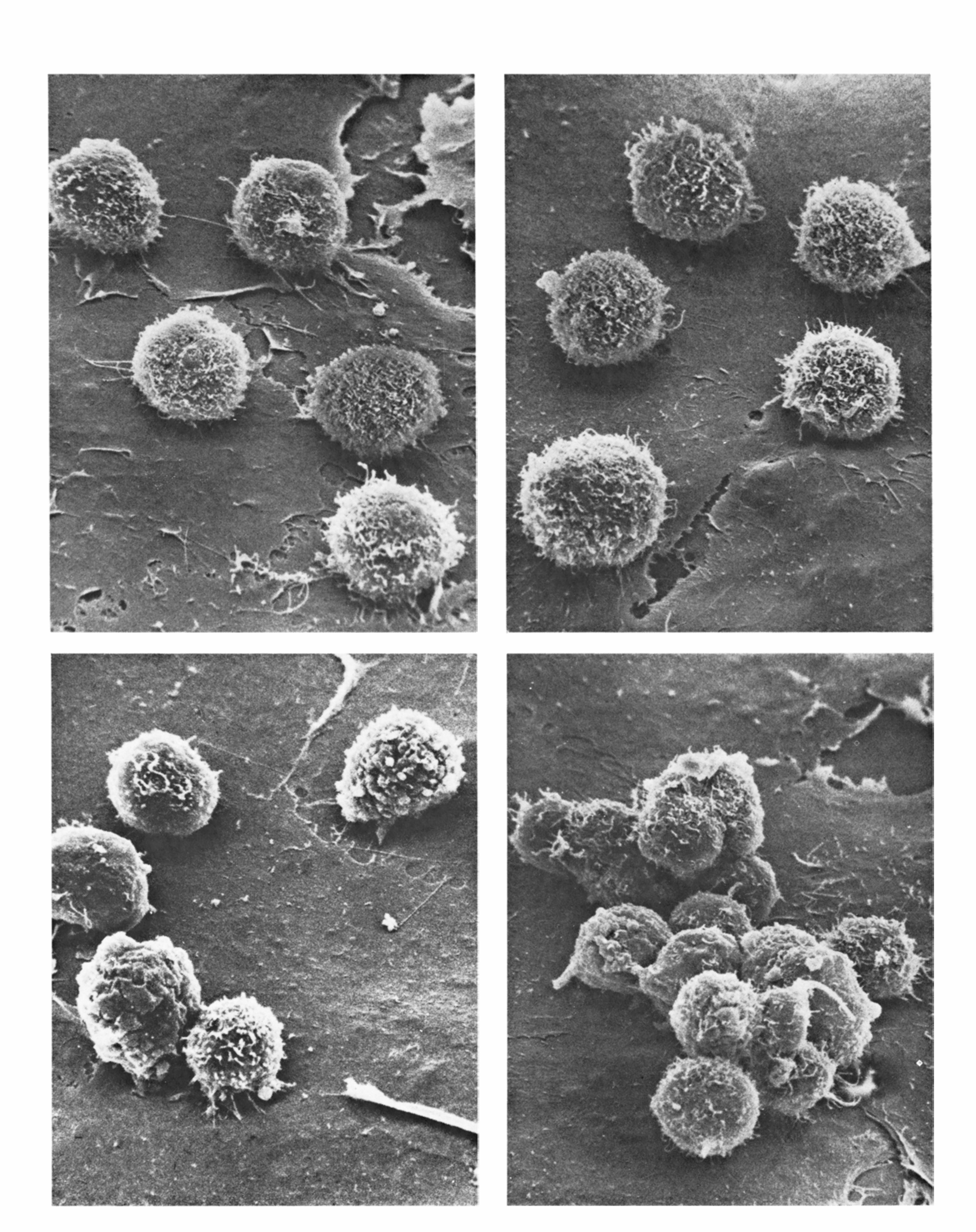
Algunas de las moléculas lipídicas (grasas) y de las proteínas que constituyen la membrana externa de la célula llevan cadenas ramificadas de moléculas de azúcar (oligosacáridos, o más brevemente, sacáridos) que sobresalen de la superficie celular: son glucolípidos y glucoproteínas. Cuando las lectinas, que poseen múltiples lados de unión, se unen a estos sacáridos, ponen en mutua conexión a un gran número de células, provocando su aglutinación o reagrupación. Cada lectina se une de forma más o menos específica a una determinada molécula o a un determinado grupo de moléculas de azúcar. (A esta característica de selectividad deben su nombre las lectinas, que les fue asignado en 1954 por uno de los pioneros en este campo, William C. Boyd, de la Boston University School of Medicine, y que deriva del latín *legere,* escoger.)

Debido a la selectividad de la respuesta de aglutinación, las lectinas sirven como sustancias de prueba para la identificación y localización o estudio de la distribución de los azúcares sobre la superficie de las células. Pueden distirguir entre glóbulos rojos de distinto grupo sanguíneo y, gracias a la facilidad con que aglutinan a las células malignas, suelen ser capaces de diferenciarlas de las células normales, poniendo de manifiesto algunos de los cambios que sufre la célula cuando se vuelve maligna. Por otra parte, las lectinas estimulan la división de las células llamadas linfocitos, pertenecientes al sistema de inmunidad. Durante dicho proceso mitótico aumenta el tamaño del núcleo del linfocito y los distintos cromosomas se convierten en estructuras discretas, por lo que las lectinas constituyen una herramienta importante tanto en el análisis cromosómico como en estudios relativos a una amplia gama de fenómenos inmunológicos.

La primera vez que se reconoció la presencia de las lectinas fue hace casi 90 años, al observar su capacidad para aglutinar a los glóbulos rojos, por lo cual se les llamó hemaglutininas. Luego se les llamó fitohemaglutininas, porque fueron aisladas a partir de plantas. Con el tiempo se descubrió que las lectinas no sólo aglutinaban a los glóbulos rojos sino también a otros tipos de células, como son linfocitos, fibroblastos (células precursoras del tejido conjuntivo), espermatozoos, bacterias y hongos. Además, ahora ya se ha detectado la presencia de lectinas no sólo en plantas (incluyendo a las bacterias) sino también en algunos invertebrados, por ejemplo los caracoles, y en algunos vertebrados; hace poco, Vivian Teichberg, de nuestro departamento del Weizmann Institute (Israel), descubrió la presencia de una lectina en la anguila eléctrica. No obstante, parece que las lectinas están más ampliamente distribuidas entre las plantas: de las 3000 especies examinadas en los últimos años, en casi 1000 de ellas se han hallado lectinas. Las leguminosas son particularmente ricas en lectinas; éstas pueden llegar a representar de un 1,5 a un 3 por ciento del contenido proteico de la semilla de soja o de judía, por indicar un ejemplo. Hasta el momento actual se ha logrado la purificación e identificación de la estructura química de unas 50 lectinas, en su mayoría de origen vegetal.

H. Stillmark dio la primera descripción de lo que ahora llamamos una lectina en un informe que presentó en 1888 a la Universidad de Dorpat (Estonia), una de las universidades más antiguas de la Rusia zarista. Stillmark estaba investigando los efectos tóxicos que tienen sobre la sangre los extractos de semilla de ricino *(Ricinus communis),* y observó que provocaban una aglutinación de los glóbulos rojos. Obtuvo pruebas demostrativas de que el material responsable de la aglutinación era una proteína, a la que dio el nombre de ricina. Tras un breve período de tiempo, H. Hellin, que trabajaba en la misma universidad, comprobó que el extracto tóxico de la semilla de *Abrus precatorius* también provocaba la agrupación de los glóbulos rojos. A la nueva aglutinina se la denominó abrina. Ambas aglutininas llamaron de inmediato la atención del bacteriólogo alemán Paul Ehrlich, quien descubrió que dichas sustancias podían utilizarse para estudiar algunos problemas de inmunología en lugar de emplear las toxinas bacterianas, como la toxina de la difteria, de uso corriente entre los bacteriólogos de finales del siglo pasado.

Con la ayuda de la ricina y de la abrina, Ehrlich pudo establecer, en la década de 1890, algunos de los principios más fundamentales en inmunología. Por ejem-



EL EFECTO DE UNA LECTINA sobre las células normales difiere del que tiene sobre las células transformadas en malignas. Cuando se tratan fibroblastos normales de ratón *(arriba, izquierda)* con la lectina concanavalina *A*, extraída de la judía, no hay aglutinación de las células *(arriba, derecha)*. Los fibroblastos *(abajo, izquierda)* que han sido transformados por exposición al virus de simio 40 (SV40), un virus que es carcinogénico en determinados animales, parecen comportarse de forma distinta: cuando se trata a las células transformadas en malignas con concanavalina *A*, se produce aglutinación *(abajo, derecha)*. Las células están aumentadas unas 1 800 veces. (Micrografía de Collard y Temmink.)

D–GLUCOSA
Glc

L–FUCOSA
Fuc

N-ACETIL-D-GLUCOSAMINA
GlcNAc

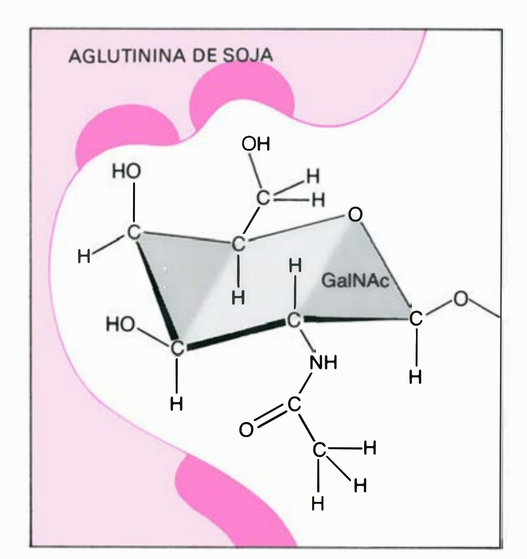
D–GALACTOSA
Gal

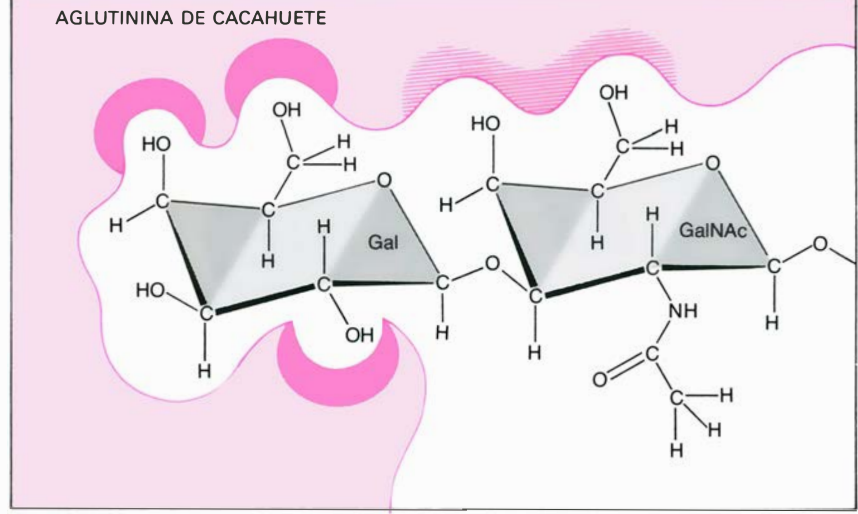
D–MANOSA
Man

ACIDO N–ACETILNEURAMINICO
NANA

N–ACETIL–D–GALACTOSAMINA
GalNAc

SEIS MONOSACARIDOS, o unidades glucídicas, que se encuentran corrientemente en las membranas externas de las células animales, están representadas aquí de forma esquemática junto con la glucosa, a partir de la cual el organismo puede sintetizar estos seis azúcares. Su estructura central es la del anillo piranosa, de cinco átomos de carbono, al que se unen grupos hidroxilo (OH). *D* y *L* indican la orientación espacial.





LOS LADOS DE UNION de las lectinas son hendiduras en las que encajan determinados azúcares, produciéndose un contacto entre grupos laterales del azúcar y lados de unión *(color oscuro)* de la lectina. La aglutinina de soja se une a la acetilgalactosamina, quizá como se sugiere a la izquierda, o a la galactosa. La aglutinina de cacahuete también se une a al galactosa, pero se une más firmemente a una combinación de unidades de galactosa y de acetilgalactosamina, lo que indica que su lado de unión podría disponer de más regiones de enlace *(zonas rayadas).*

plo, en 1891, dio a conocer el hecho de que se podía inmunizar a ratones contra la ricina mediante inyecciones subcutáneas repetidas de pequeñas dosis de esta toxina. Más adelante, comprobó que el suero de un ratón inmunizado podía neutralizar la toxicidad de la ricina. Dicha acción era específica: la "antirricina", aparecida en el suero de un animal inmunizado con ricina, no servía para neutralizar los efectos tóxicos de la abrina, ni tampoco la "antiabrina" para neutralizar los de la ricina. Y así fue como Ehrlich demostró que el fenómeno de la inmunoespecificidad estaba relacionado con el antisuero. En 1908, Karl Landsteiner, del Rockefeller Institute for Medical Research, afirmó que las lectinas poseen especificidad de especie. Basó esta afirmación en el hecho de que, mientras los glóbulos rojos de conejo se aglutinan con pequeñas cantidades de lectina de lenteja, dicha lectina no tiene ningún efecto sobre los glóbulos rojos de paloma, aun a elevadas concentraciones.

Los primeros experimentos se llevaron a cabo, en su mayoría, con extractos vegetales que eran bastos, según los criterios de purificación actuales; hoy en día ya se sabe que tanto la ricina como la abrina son mezclas de una proteína de elevada toxicidad, con capacidad de unión con los azúcares pero no de aglutinación, y de una lectina no tóxica. La primera lectina que se logró purificar fue la concanavalina *A*, procedente de la judía, que fue cristalizada en 1919 por James B. Sumner, de la Universidad de Cornell. (Su estructura tridimensional se ha establecido recientemente con todo detalle en el laboratorio de Gerald M. Edelman, de la Rockefeller University.) En 1936, Sumner y Stacey F. Howell comprobaron, por una parte, que la adición de concanavalina *A* a una solución de glucógeno, carbohidrato que actúa como forma de reserva de los azúcares en los organismos, provocaba la precipitación del glucógeno de la solución y, por otra, que el azúcar de caña inhibía la aglutinación de los glóbulos rojos mediante concanavalina *A*.

Sumner y Howell establecieron la hipótesis de que la hemaglutinación provocada por la concanavalina *A* podría ser la consecuencia de una reacción de la proteína con carbohidratos situados sobre la superficie de los glóbulos rojos. Esta sugerencia inicial fue confirmada por unas observaciones realizadas en 1952 por Winifred Watkins y Walter Morgan, del Lister Institute de Londres: la adición de algunos azúcares sencillos podía inhibir o impedir la hemaglutinación provocada por lectinas. Al parecer, las moléculas de azúcar inhibidoras ocupan los lados de unión de las lectinas, interfiriendo, por tanto, en el proceso de unión de la lectina a las unidades de azúcar situadas sobre los glóbulos rojos. En otras palabras, las lectinas se unen a los azúcares, y mediante esta unión provocan la aglutinación de los glóbulos rojos. Por ejemplo, los azúcares manosa o glucosa inhiben específicamente la aglutinación de los glóbulos rojos por concanavalina *A*, indicando que la concanavalina *A* se une a dichos azúcares.

En 1945, Boyd había descubierto que una lectina podía poseer "especificidad de grupo sanguíneo": podía aglutinar a los glóbulos rojos de un tipo pero no a los de otro. Boyd comprobó que la lectina de haba de Lima podía aglutinar a los glóbulos rojos humanos del grupo *A*, pero no a los del grupo *B* o *O*. Algo más adelante, K. O. Renkonen, de Helsinki, informó que había comprobado que las semillas de *Lotus tetragonolobus* contenían una lectina específica para los glóbulos del grupo *O*. Se ha visto que muchas otras lectinas presentan especificidad para los tipos *A* y *O*. La búsqueda de una lectina anti-*B* fue bastante larga, pero hace poco Irwin J. Goldstein, de la Universidad de Michigan, aisló una lectina *B*-específica de las semillas de *Bandeiraea simplicifolia*.

La especificidad de algunas lectinas está tan claramente definida que pueden distinguir entre sí distintos subgrupos sanguíneos. Por ejemplo, la lectina de la leguminosa *Dolichos biflorus* reacciona más intensamente con los glóbulos rojos del tipo A_1 que con los del tipo A_2. Las lectinas también poseen especificidad para determinados tipos pertenecientes a otra clasificación de la sangre humana: diferencian el tipo *M* del tipo *N*. Ordinariamente se suele determinar el grupo sanguíneo por la presencia en el suero de anticuerpos anti-*A* o anti-*B*, pero también se podría llevar a cabo dicha determinación mediante lectinas. Una de las razones que abogan a favor de ello es que no existe ningún anticuerpo anti-*O* natural. Por otra parte, las lectinas suelen ser la base del diagnóstico y de la tipificación de las personas "secretoras": personas que segregan, en su saliva, en su orina y en otros líquidos corporales, unas glucoproteínas que tienen especificidad de grupo sanguíneo.

Watkins y Morgan lograron establecer en 1953 la relación existente entre los azúcares y la especificidad de grupo sanguíneo. Demostraron que la *N*-acetilgalactosamina es el azúcar que mejor inhibe la aglutinación de los glóbulos rojos del tipo *A* provocada por la lectina de haba de Lima, quedando de esta forma determinado el azúcar responsable de la especificidad para el tipo *A*. Por otra parte, se demostró que el azúcar determinante de la especificidad para el tipo *O* era la fucosa, ya que es el azúcar que mejor inhibe la aglutinación de las células del tipo *O* ocasionada por la lectina de *Lotus tetragonolobus*, específica del tipo *O*. Tanto una conclusión como otra han sido comprobadas por experiencias posteriores. De paso, el trabajo inicial de Watkins y Morgan fue una de las primeras pruebas de la presencia de los azúcares en las membranas celulares.

Las diversas actividades biológicas de las lectinas que acabo de describir provienen todas de una sola propiedad: su capacidad de unión con los azúcares. Cada molécula de una lectina posee al menos dos regiones, quizá hendiduras o surcos, cada una de las cuales puede acoplarse a una molécula complementaria de azúcar o a varias unidades de azúcar pertenecientes a un oligosacárido. La lectina se une a los azúcares de las superficies celulares por medio de estos lados de unión. Teniendo a disposición una serie de lectinas que difieren en su especificidad (por presentar lados de unión de formas diferentes), sería posible adquirir muchos nuevos conocimientos sobre la composición de una determinada superficie celular.

Antes mencioné que la lectina de haba de Lima es específica para la *N*-acetilgalactosamina y que la de *Lotus tetragonolobus* lo es para la fucosa. Mi colega Halina Lis y yo hemos descubierto que la aglutinina de soja también es específica para la *N*-acetilgalactosamina, pero de una forma menos restrictiva: la aglutinina de soja se une a la *N*-acetilgalactosamina tanto si las moléculas de azúcar están unidas en posición alfa como si lo están en posición beta, mientras que la lectina de haba de Lima sólo se une a las moléculas de *N*-acetilgalactosamina que están unidas en posición alfa. En las membranas celulares se encuentran ambas configuraciones, pero el azúcar determinante de la especificidad para el grupo sanguíneo *A* es la *N*-acetilgalactosamina con unión en posición alfa. Por tanto, la lectina de haba de Lima es específica para el grupo sanguíneo *A*, mientras que la aglutinina de soja no es específica de ningún grupo sanguíneo.

Además de unirse a la *N*-acetilgalactosamina, la aglutinina de soja se une a la

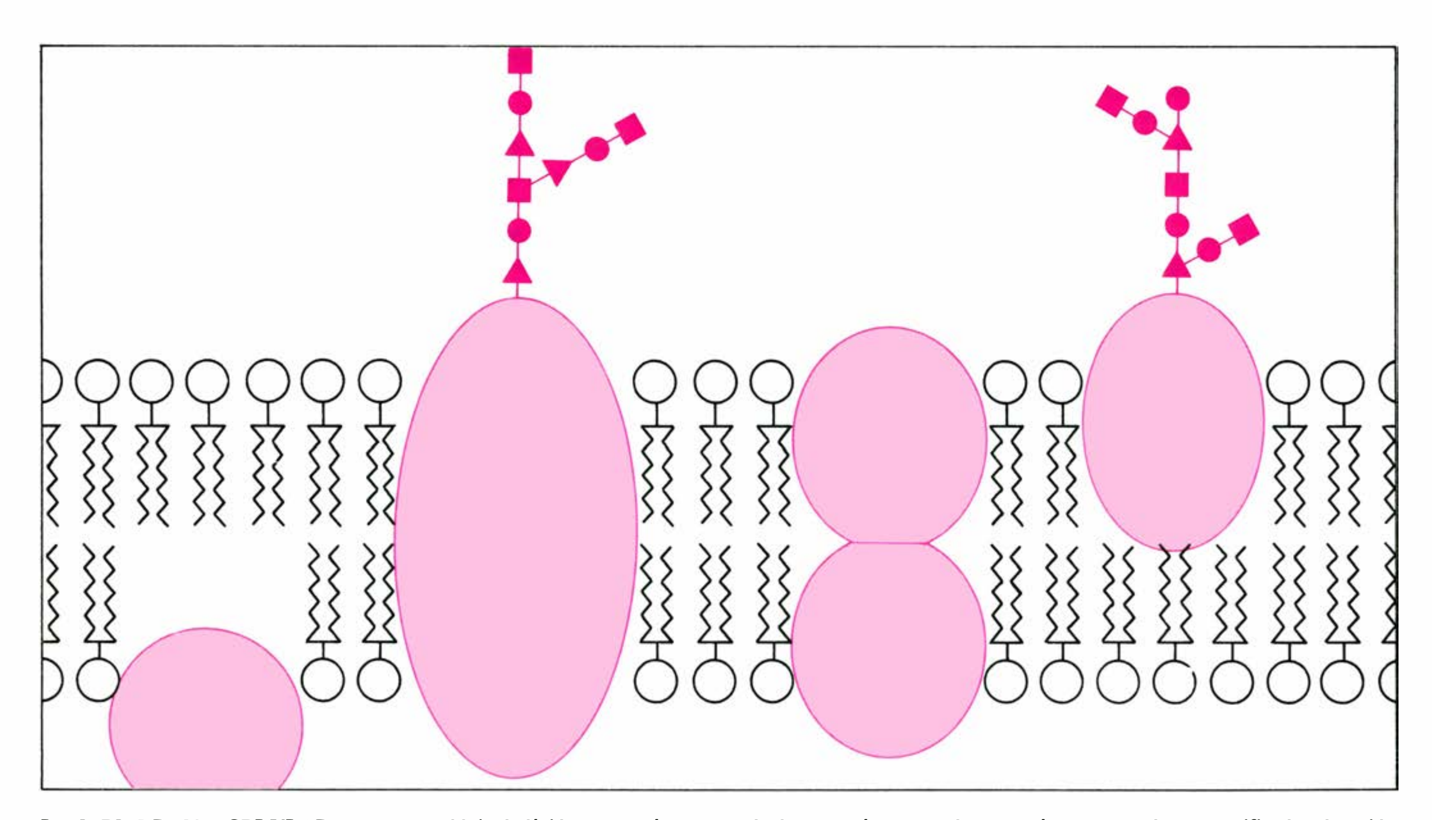
galactosa y, en consecuencia, provoca la precipitación de glucoproteínas en solución, tales como el colágeno que presenta una galactosa en posición terminal. Por el contrario, la aglutinina de semilla de trigo no reacciona con el colágeno; posee especificidad para los oligosacáridos formados por unidades de *N*-acetilglucosamina y se combina, por tanto, con la quitina, que es un polímero de *N*-acetilglucosamina, o con el ovomucoide, que es rico en ese azúcar. Mediante el uso de las lectinas adecuadas, se puede lograr la separación de polisacáridos, por una parte, y glucoproteínas, por otra, o la extracción de glucoproteínas de mezclas que contienen proteínas y otros compuestos, desprovistos de azúcares.

La unión de la lectina con el azúcar es bastante débil. No provoca la formación de enlaces covalentes sino que es reversible, como la reacción de un enzima con su sustrato o de un anticuerpo con su antígeno. De hecho, la reacción de precipitación que se da entre una lectina y los polisacáridos o glucoproteínas adecuados es análoga en casi todos sus aspectos a un sistema antígeno-anticuerpo; en ella, la lectina desempeña el papel del anticuerpo y el polisacárido o glucoproteína el papel del antígeno. Por ejemplo, en ambos sistemas sucede que el precipitado que se forma se suele disolver cuando se halla presente en exceso cualquiera de los compuestos que participan en la reacción. La inhibición que ejercen azúcares específicos sobre la formación de un precipitado entre lectina y polisacárido (o glucoproteína) es análoga a la acción de los haptenos, unas moléculas pequeñas que se combinan con anticuerpos determinados y actúan como inhibidoras de la formación de un complejo entre el anticuerpo y el antígeno correspondiente.

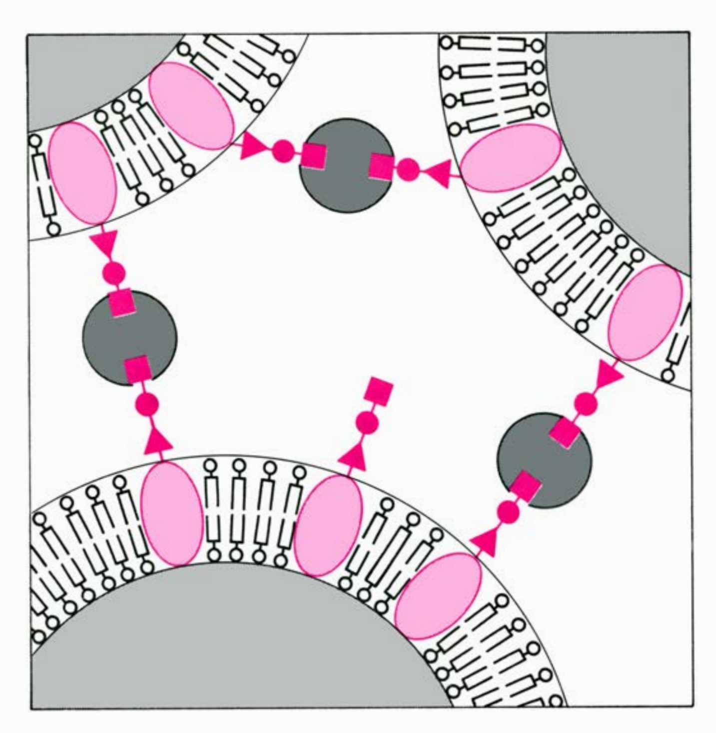
Incluso se ha emitido la hipótesis de que las lectinas son anticuerpos vegetales. Sin embargo, existen diferencias muy marcadas entre ambos tipos de proteínas. La más importante es que los anticuerpos son productos del sistema inmune de los animales superiores, cuyo organismo responde al estímulo de la penetración de una sustancia extraña con la elaboración de dichos anticuerpos; las lectinas, en cambio, se hallan presentes como proteínas constituyentes de sus organismos y sobre todo de los organismos que, como las plantas, son incapaces de presentar respuesta inmune y de formar anticuerpos. Otra diferencia consiste en que el margen de especificidad de los anticuerpos es amplio y abarca no sólo a los azúcares sino también a muchos otros tipos de compuestos, como son aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos (aunque, por supuesto, cada anticuerpo es específico para el antígeno que provocó su elaboración). No se conoce ninguna lectina que sea específica para compuestos que no sean carbohidratos.

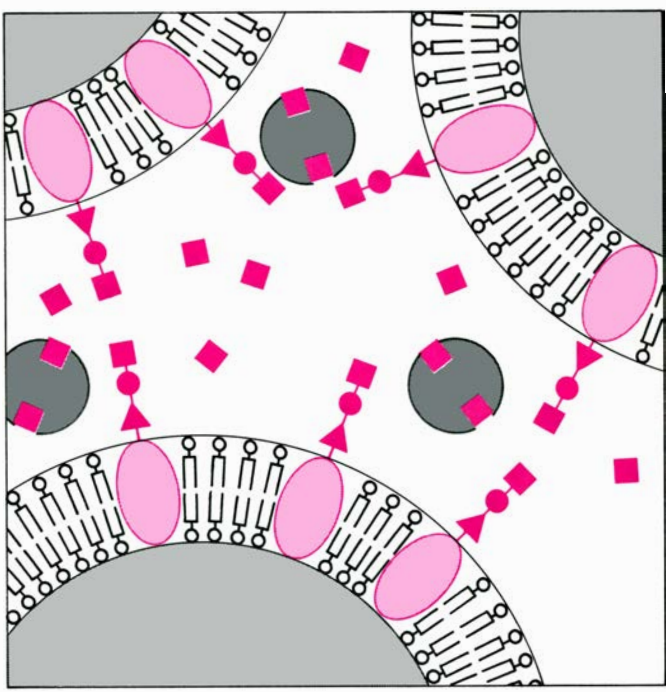
Una tercera diferencia reside en la estructura química. Todos los anticuerpos tienen una estructura similar, mientras que las lectinas difieren mucho entre sí por su estructura; el examen de la composición aminoácida, del peso molecular y de otras propiedades moleculares de un gran número de lectinas demuestra que poseen pocas características comunes exceptuando el hecho de que todas son proteínas. Por ejemplo, la aglutinina de soja es una glucoproteína que carece de enlaces ditiol (azufre-azufre) en su molécula; su peso molecular es de 120 000, está constituida por cuatro subunidades y presenta dos lados de unión. La aglutinina de semilla de trigo no es una glucoproteína y es rica en enlaces ditiol; su peso molecular es de 36 000, está constituida por dos subunidades idénticas y presenta cuatro lados de unión con los azúcares.

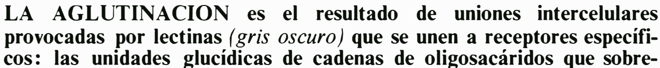
No hay ninguna otra propiedad de las lectinas que haya contribuido tanto a su importancia en la investigación en biolo-



LA MEMBRANA CELULAR es un ensamblaje de lípidos y proteínas. El armazón estructural lo constituye una doble capa de moléculas lipídicas, cada una de las cuales presenta una cabeza hidrosoluble y una doble cola hidrófoba. Las moléculas de proteína *(en color)* se apoyan sobre las superficies de la doble capa o se hallan alojadas en su seno. Algunas de las proteínas son glucoproteínas, con cadenas ramificadas de unidades glucídicas *(de color oscuro)* a las que pueden unirse determinadas lectinas. En general, algunos de los lípidos de la membrana son glucolípidos (no se representan aquí), y en tal caso sus cadenas de azúcar, que sobresalen de la membrana, participan en la unión con las lectinas.







LA AGLUTINACION es el resultado de uniones intercelulares provocadas por lectinas *(gris oscuro)* **que se unen a receptores específicos: las unidades glucídicas de cadenas de oligosacáridos que sobresalen de la superficie celular** *(izquierda).* **La aglutinación se inhibe o se impide si a la suspensión de células se añade el monosacárido responsable de la unión, ya que ocupa los lados de unión de las lectinas** *(derecha).*

gía como su capacidad para aglutinar a las células malignas de manera selectiva. Como a menudo es el caso, dicha propiedad fue descubierta por casualidad. Este hallazgo fue publicado en 1963 por Joseph C. Aub, en el Massachusetts General Hospital de Boston, habiendo surgido de unas investigaciones llevadas a cabo tras retirarse éste de la Harvard Medical School. En esta época, Aub era uno de los poquísimos investigadores que creían que la diferencia entre las células cancerosas y las normales residía en su membrana externa: que las alteraciones de las propiedades de la superficie celular permitían a las células cancerosas seguir multiplicándose cuando las células normales dejan de hacerlo, separarse de su localización original, esparcirse por todo el cuerpo, alojarse en un medio distinto y formar allí colonias nuevas.

En aquel entonces parecían muy extrañas estas ideas; la mayoría de los investigadores las consideraban completamente desprovistas de fundamento, casi demenciales. A fin de poder averiguar si la superficie de las células malignas era diferente de la de las células normales. Aub estudió su respuesta a la incubación con diversos enzimas. Sólo observó una diferencia en el caso de uno de los enzimas, una lipasa de germen de trigo: al parecer, el enzima no afectaba a las células normales, pero se producía la aglutinación de las células malignas. Sin embargo, al sustituir la lipasa de germen de trigo por una lipasa pancreática, no observó aglutinación en ninguno de los dos tipos de células. Un estudio más profundo de la lipasa de germen de trigo demostró que la actividad enzimática del preparado podía destruirse por calentamiento, mientras que no ocurría así con el efecto de aglutinación. Posteriormente, Aub y sus colaboradores comprobaron que el preparado de lipasa de germen de trigo estaba contaminado por una pequeña proteína que era la responsable de la actividad aglutinadora. Hoy en día, a esta proteína se le llama aglutinina de germen de trigo.

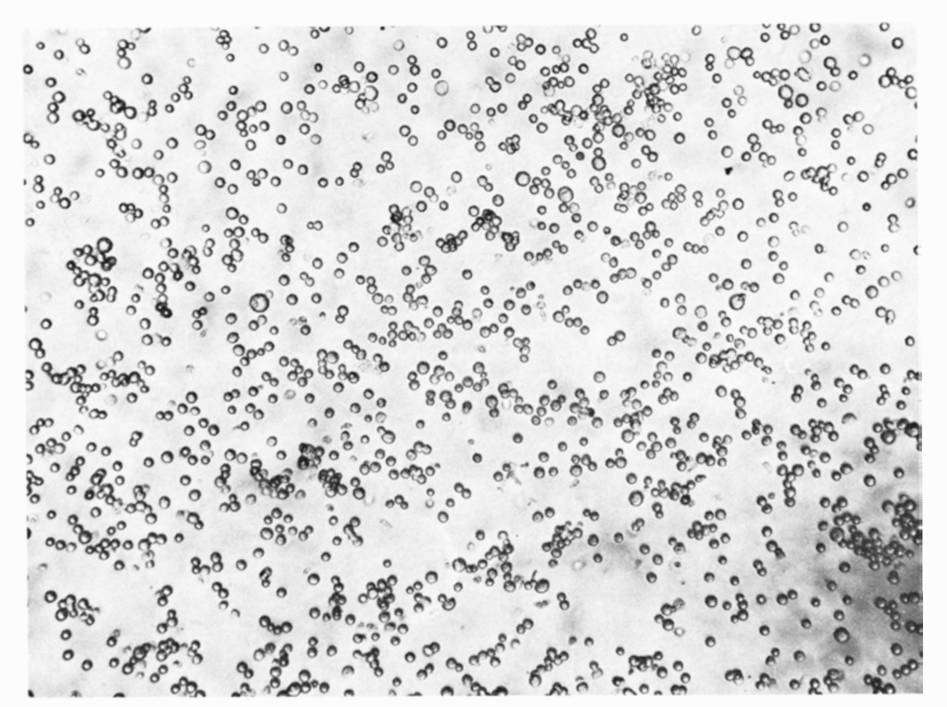
El descubrimiento de Aub inició una nueva era en la investigación de las lectinas. De inmediato, le siguió la purificación de la aglutinina de germen de trigo por Max M. Burger, de la Universidad de Princeton, quien utilizó la proteína pura para llevar a cabo amplios estudios sobre los cambios que acontecen en la membrana de la célula cuando ésta sufre la transformación maligna. A pesar de ello, entonces no se podía obtener aglutinina de germen de trigo comercial y no era fácil preparar la forma purificada. Las lectinas empezaron a ser más comunes en los laboratorios de biología sólo después de que Leo Sachs y Michael Inbar, del Weizmann Institute, comprobaron la aglutinación de las células malignas ocasionada por la concanavalina *A*, porque la concanavalina *A* se expende en el comercio y es relativamente barata. Sachs, Ben-Ami Sela, Halina Lis y el autor observaron que la aglutinina de soja también podía distinguir las células malignas de las normales, y desde entonces se ha demostrado que numerosas lectinas poseen la misma propiedad. Por norma general, las células malignas se aglutinan con concentraciones muy bajas de dichas lectinas (de 10 a 15 microgramos por mililitro), mientras que las células normales no suelen aglutinarse a menos que la concentración de la lectina sea por lo menos de 10 a 20 veces mayor. (Hay algunas excepciones: ciertas células tumorales no se aglutinan con concentraciones bajas de una determinada lectina y ciertos tipos de células normales se aglutinan con una lectina, incluso cuando la concentración de ésta es muy baja.)

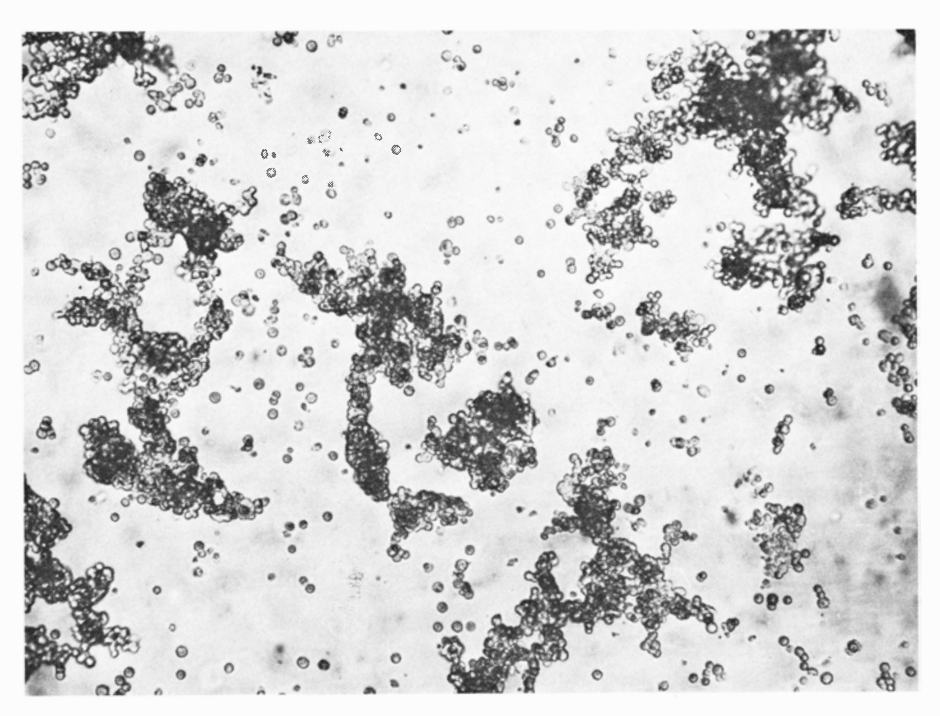
Burger hizo una observación interesante: aun en el caso de las células normales que no suelen aglutinarse en presencia de una lectina, siempre existe una pequeña proporción que sí se aglutina. Identificó a las células aglutinadas y observó que estaban en proceso de mitosis, y por tanto dedujo que durante la mitosis la membrana de las células normales se asemeja hasta cierto punto a la de las células transformadas. Este hecho le hizo pensar que en el ciclo celular habría un punto de cambio crítico. Según Burger, quizá la transformación maligna actúe como un guardagujas ferroviario

que desvía a la célula, apartándola de su ciclo normal (en el cual se produce retardo o una pausa total después de la mitosis) y la lleva hacia una división continuada, interminable. Aunque aún no comprendemos cómo se opera este cambio, quizá sea útil para la investigación futura tener presente la posibilidad de que en el ciclo celular haya un punto crítico, en el que cualquier célula normal puede, o bien ser conducida hacia un reposo, o bien ser transformada y, por tanto, desviada hacia un crecimiento maligno.

Falta mucho todavía para que podamos conocer con exactitud la manera en que se realizan los cambios de la superficie celular en el trascurso de la transformación maligna. Los estudios llevados a cabo con lectinas han convencido a muchos investigadores de que la membrana celular desempeña un papel fundamental en la regulación del control del crecimiento, pero lo que no se sabe es cómo se efectúa dicho control. También son necesarias más investigaciones antes de que pueda quedar claro si las alteraciones de la superficie celular detectadas con la ayuda de las lectinas están en simple correlación con la transformación o si tienen un papel causal en el proceso maligno.

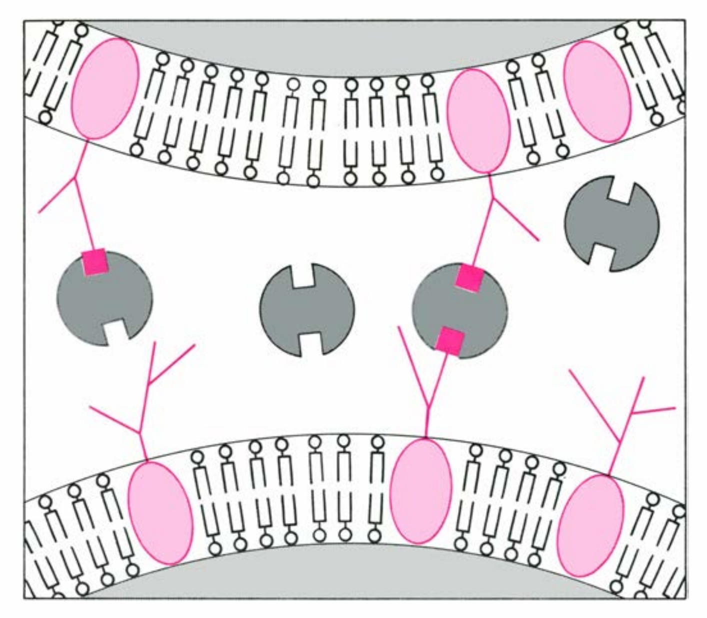
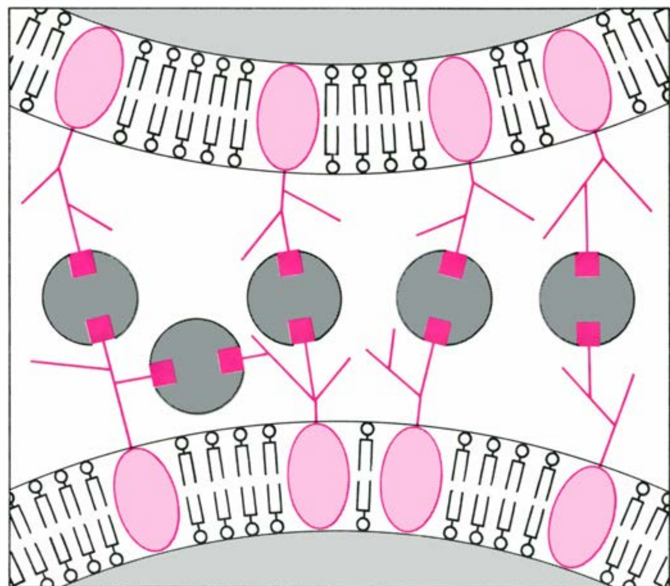
Además de detectar los cambios de la superficie celular que acompañan a la transformación maligna, las lectinas están proporcionando pruebas de que la superficie celular también se altera a lo largo de la diferenciación celular embrionaria. En 1971, Aaron A. Moscona, de la Universidad de Chicago, demostró por primera vez que el efecto de la concanavalina *A* sobre las neuronas de la retina de embrión de pollo dependía en gran parte de la edad del embrión. La concavalina *A* ocasionaba una aglutinación rápida y masiva de las células dispersas de embriones jóvenes (de ocho a nueve días). Dicho efecto variaba al diferenciarse y madurar las células retinianas, de modo que, a los 20 días, sólo se obtenía una aglutinación muy escasa, o nula, de las células, incluso con grandes dosis de concavalina *A*. Los mencionados cambios en la forma de aglutinarse las células a lo largo de la diferenciación también se observaron con otras lectinas. Estos resultados demuestran claramente que, con la diferenciación, las moléculas portadoras de carbohidratos situadas en la superficie de la célula retiniana sufren alteraciones drásticas lo cual, según Moscona, debe constituir un aspecto integral del programa global de diferenciación de las células.



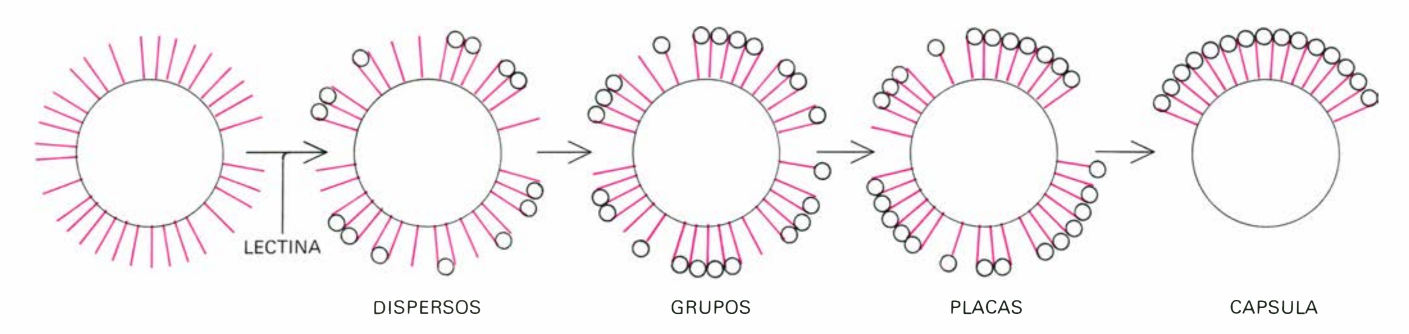


LA AGLUTINACION SELECTIVA de las células malignas transformadas se pone de manifiesto en esta micrografía realizada en el laboratorio del autor. Se incubaron células normales de rata *(arriba)* y células de rata transformadas por una infección de virus polioma *(abajo)* durante 30 minutos en presencia de una lectina, la aglutinina de soja. A lo largo del experimento se registró una aglutinación masiva de células transformadas, pero no la hubo de células normales.

Como ya mencioné anteriormente, estamos muy lejos de una comprensión total de la naturaleza de los cambios que se dan en la superficie celular y se ponen de manifiesto mediante las lectinas. ¿Cómo es posible que conozcamos tan poco cuando dichos cambios se pueden detectar con una prueba tan sencilla como la aglutinación celular? La verdad es que, a pesar de su aparente sencillez, la aglutinación celular ha resultado ser un fenómeno muy complejo en el que intervienen numerosos factores. No hay duda de que, para que las células se aglutinen, las moléculas de lectina que se unen a las moléculas de azúcar situadas en la superficie celular deben formar puentes entre las células. En un principio, se tomó como un simple corolario la suposición de que, cuando las células no se aglutinaban, se debía a uno de estos dos motivos: o bien que no había ningu-

LA AGLUTINABILIDAD SELECTIVA de las células transformadas parece deberse a una mayor densidad local de lectinas en la superficie de dichas células. El número de lectinas unidas es aproximadamente el mismo en las células normales *(izquierda)* **y en las células transformadas** *(derecha).* **En las células transformadas, los receptores de lectina se encuentran más cerca unos de otros; así se puede formar un mayor número de puentes cruzados en un área. Las pruebas de la redistribución de las unidas son de micrografías de moléculas marcadas.**



LOS RECEPTORES DE LECTINA *(líneas de color)* **parecen estar distribuidos al azar sobre la superficie de una célula normal o maligna, mientras no haya lectina presente** *(izquierda).* **La adición de una lectina** *(círculos pequeños)* **que presenta varios lados de unión interconecta a los receptores, conjuntándolos en primer lugar en grupos, luego en placas mayores, y uniéndolos finalmente en una sola "cápsula".**

na unión entre las moléculas de lectina y la superficie celular, o bien que la cantidad de lectina unida era muy pequeña.

Para gran sorpresa de todos, se demostró que la realidad era otra. Unas mediciones de los lados de unión mediante lectinas marcadas con radiactividad puso de manifiesto que, tanto si las células eran aglutinadas por la lectina como si no lo eran, el número total de moléculas de lectina unidas a la superficie solía ser el mismo. Por ejemplo, las células transformadas por virus que se aglutinaban con concentraciones de 10 a 20 microgramos por mililitro de aglutinina de soja podían llevar unidas, cada una, casi 10 millones de moléculas de lectina; este mismo número era el de las moléculas de lectina unidas a las células normales de las que derivaban las células malignas, a pesar del hecho de que las células normales no quedaban aglutinadas, ni siquiera al ser incubadas con 500 microgramos de aglutinina de soja por mililitro. Por otra parte, cuando a las células normales se las trata con enzimas proteolíticos para eliminar sus proteínas y glucoproteínas superficiales, las células se vuelven tan sensibles a la aglutinación por lectinas como las células transformadas, aunque el tratamiento proteolítico no hace variar el número de moléculas de lectina unidas a la superficie celular.

Se ha intentado muchas veces explicar estas enigmáticas observaciones. Una de las explicaciones corrientes se basa en unos experimentos realizados con moléculas de lectina marcadas, o bien con colorantes fluorescentes que permiten determinar su localización en la célula mediante el microscopio óptico, o bien con ferritina que permite detectar su situación en una micrografía. Estos experimentos ponen de manifiesto que existe una diferencia entre la distribución supercial de las lectinas unidas a las células normales y la de las lectinas unidas a células de tumores. Las moléculas de lectina se distribuyen al azar sobre las células normales, mientras que en las células cancerosas aparecen unidas en grupos sobre la superficie. En consecuencia, pueden formar puentes intercelulares múltiples entre las células cancerosas, formación cooperativa de uniones que explica la mayor aglutinabilidad de las células malignas en comparación con la de las células normales.

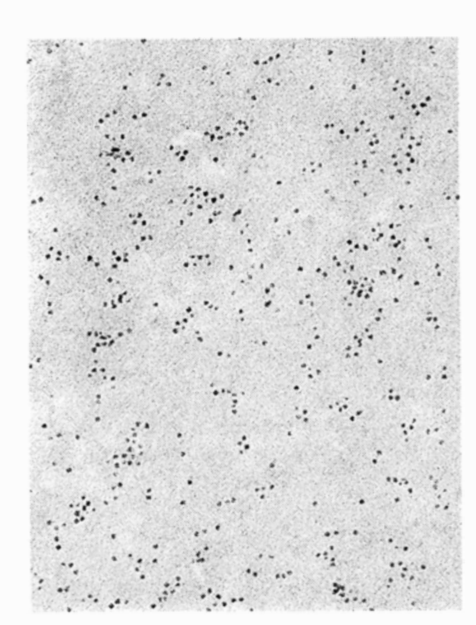
Si las moléculas de lectina se encuentran agrupadas, debe ser porque sus receptores glucídicos han sido agrupados. ¿Qué es lo que mueve a los receptores, el proceso de la transformación maligna o la aplicación de una lectina? Las in-

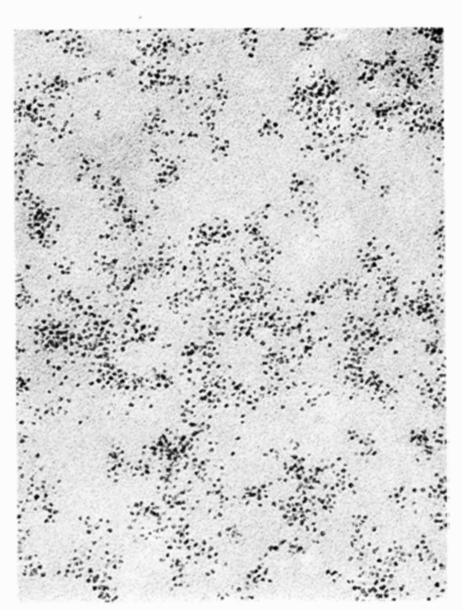
vestigaciones sugieren que la agrupación es inducida por las moléculas de lectina, pero posibilitada por la transformación. Si antes del tratamiento con lectina se limita la movilidad de los componentes de la membrana de las células cancerosas (por enfriamiento de las células o por fijación de la membrana con glutaraldehído), dichas células cancerosas presentan la misma distribución aleatoria de las moléculas de lectina unidas que las células normales. Sin embargo, si a las células se les aplica la lectina a 37 grados Celsius o antes del tratamiento con glutaraldehído, se obtiene la distribución en grupos en pocos minutos. Se cree que la agrupación es un proceso pasivo en el que las moléculas de lectina agrupan a los receptores de alguna manera, permitiendo su difusión a través de la doble capa lipídica de la membrana. En otras palabras, parece que la membrana de una célula maligna es más fluida (menos viscosa) que la de una célula normal.

Se ha postulado que la mayor fluidez de las membranas de las células malignas podría explicar, por lo menos en parte, otras características de estas células, como son la disminución de su poder de adherencia, su capacidad para migrar por todo el cuerpo alejándose de su tejido de origen y probablemente también su pérdida de la "inhibición de contacto" característica del crecimiento en las células normales. (Cuando se hace crecer en cultivo células normales, éstas dejan de dividirse cuando se tocan unas a otras, mientras que las células malignas siguen creciendo y se van amontonando.) Este hecho hace pensar que las alteraciones superficiales podrían explicar, en gran parte, la tendencia de las células cancerosas a crecer sin tener en cuenta a las células vecinas.

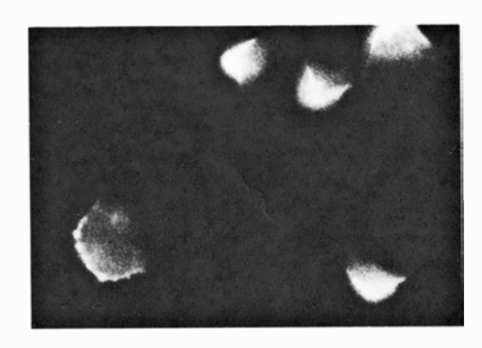
Las lectinas están desempeñando un papel cada vez más importante en inmunología, campo en el que ayudan a proporcionar una respuesta a uno de los problemas fundamentales: ¿Cuál es el mecanismo por el que un antígeno, que actúa a nivel de la superficie celular, desencadena de forma específica el crecimiento, la maduración y la proliferación de los linfocitos, y en algunos casos también la síntesis de anticuerpos en dichas células? Una de las dificultades principales en la investigación de este problema había sido el hecho de que tan sólo un pequeño número (que suele ser inferior a 1 de cada 1000) de los linfocitos *T* (nombre derivado de timo) o de los linfocitos *B* (nombre derivado de "bone marrow", médula ósea) se une a un antígeno determinado, siendo estimulado por él. En 1960, Peter C. Nowell, de la University of Pennsylvania School of Medicine, comprobó que la fitohemaglutinina (PHA), la lectina de la habichuela colorada, puede estimular a los linfocitos. Dicho descubrimiento no sólo fue de suma importancia para el análisis cromosómico (y para el estudio de las propias lectinas) sino que también fue crucial en cuanto a moldear nuestras ideas acerca de las funciones de los linfocitos. La importancia de la PHA y de otras lectinas, cuyo efecto mitogénico se conoce ahora, reside en que estimulan el crecimiento y la división de los linfocitos independientemente de la especificidad antigénica de los receptores de los linfocitos, de modo que se puede estimular y analizar una gran proporción de los linfocitos de un preparado.

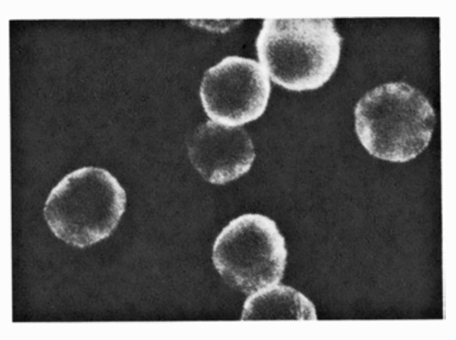
Los principales cambios de tamaño y forma y los acontecimientos bioquímicos que se observan en linfocitos estimulados por lectinas en el laboratorio se asemejan bastante a muchas de las reacciones de inmunidad que se presentan en los seres vivos por inducción de un antígeno. Cuando se estimula con lectinas a los linfocitos *B*, éstos son capaces de sintetizar inmunoglobulinas, más o menos tal como lo hacen las células cuando son estimuladas por antígenos en el laboratorio; los linfocitos *T* pueden quedar transformados en "células criminales" que destruyen cualquier célula extraña que encuentren de la misma forma en que lo hacen cuando rechazan a un tejido ajeno trasplantado. Además de su función en los estudios fundamentales sobre el mecanismo de la respuesta inmune y de su utilidad para el diagnóstico de deficiencias inmunológicas hereditarias o adquiridas, las lectinas mitogénicas también son útiles para detectar la sensibilización provo-



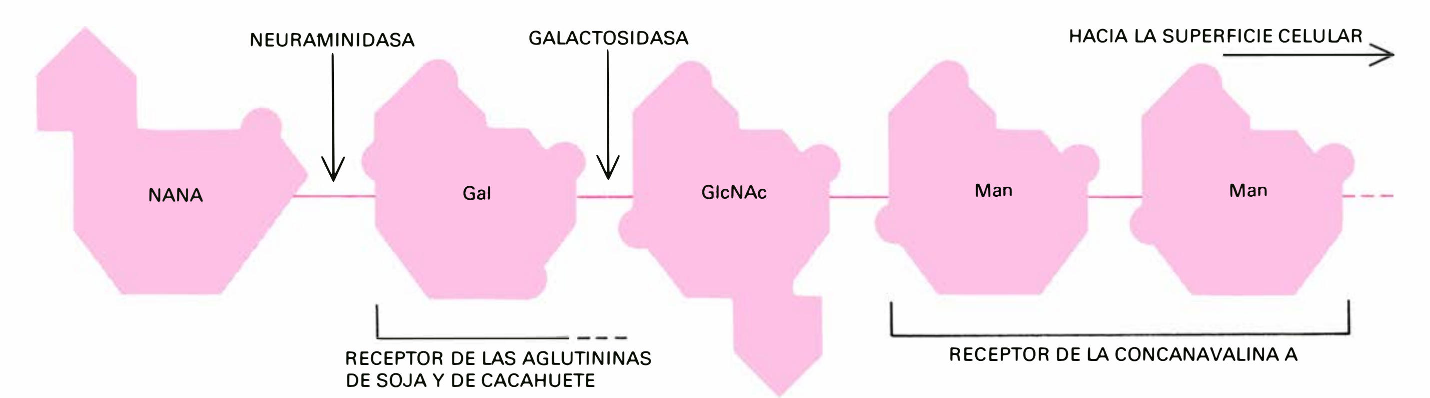


SUPERFICIES de una célula normal *(izquierda)* y de una célula transformada por el SV40 *(derecha)* aumentadas 100 000 veces. Micrografía realizada por Garth L. Nicolson. Ambas células se incubaron con concanavalina *A* marcada con ferritina, una sustancia opaca a los electrones. La lectina está esparcida de modo uniforme en la célula normal y reunida en grupos en la célula transformada.

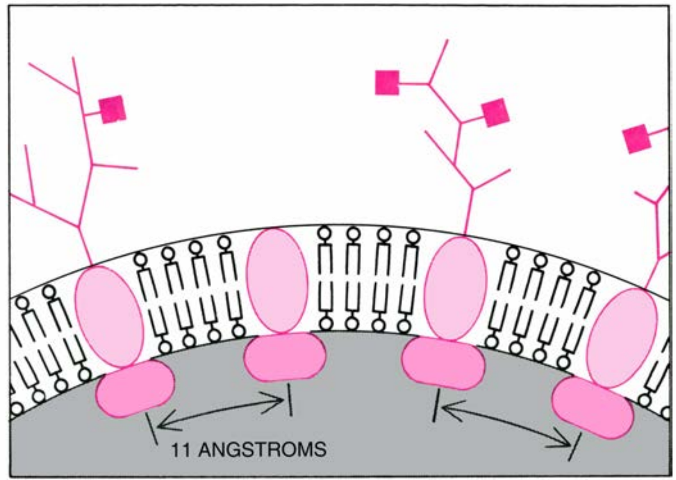


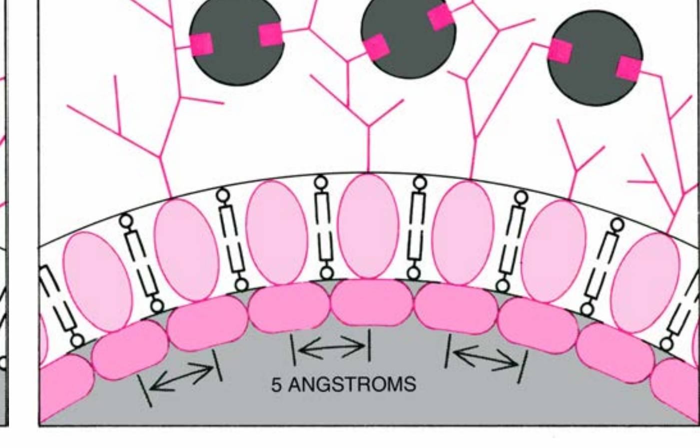


SE FORMAN CAPSULAS SOBRE LA SUPERFICIE de células leucémicas de ratón cuando se incuban con concanavalina *A* marcada con un colorante fluorescente *(izquierda)*, pero esto no ocurre si antes del tratamiento con lectina se fijan las células con glutaraldehído a fin de inmovilizar a los receptores *(derecha)*. El experimento indica que las lectinas agrupan a los receptores.



LA ESTRUCTURA del polisacárido que sirve de receptor de la lectina en la superficie de los linfocitos se establece eliminando sucesivamente determinadas unidades glucídicas mediante enzimas específicos. La eliminación del ácido neuramínico permite la unión de las lectinas específicas de la galactosa; la eliminación de ésta impide la unión de las lectinas anteriores, pero deja a la célula sensible a la concanavalina *A*.





EL EFECTO "TRANSMEMBRANA", puesto en evidencia por Nicolson y Tae H. Ji, de la Universidad de Wyoming, al estudiar las membranas de glóbulo rojo, que poseen varias proteínas, una de las cuales, la espectrina, se encuentra en la cara interna *(color suave)*. Lograron formar puentes de unión entre moléculas de espectrina adyacentes por medio de un reactivo de unos 11 angstroms de longitud *(izquierda)*. Al parecer, la adición de una lectina juntaba unas glucoproteínas que traspasaban la membrana, lo que a su vez movía a las moléculas de espectrina situadas en la cara interna de la membrana, de modo que éstas se podían unir entre sí mediante un reactivo de tan sólo cinco angstroms de longitud *(derecha)*.

cada por agentes infecciosos o por algunas enfermedades de autoinmunidad y para vigilar los efectos de varias formas de inmunoterapia.

Los estudios sobre la estimulación mitogénica mediante lectinas han aportado una importante información sobre la estructura y la organización de los sacáridos de la superficie celular. Al igual que la aglutinación, la estimulación mitogénica es el resultado de la unión de una lectina a las unidades glucídicas de glucoproteínas o glucolípidos de la superficie celular: este hecho fue demostrado por primera vez cuando se observó que la actividad mitogénica de la concanavalina *A* podía anularse añadiendo una solución de manosa o glucosa al medio en que incubaban los linfocitos con la lectina. Experimentos análogos revelan con detalle la composición de los receptores. Unos estudios llevados a cabo en nuestro departamento principalmente por Abraham Novogrodsky, demostraron, entre otras cosas, que las dos lectinas específicas para la galactosa, es decir, la aglutinina de soja y la aglutinina de cacahuete, no lograban la estimulación de los linfocitos de rata a no ser que se eliminara de la superficie de las células al azúcar denominado ácido siálico (o neuramínico). Si se eliminaba posteriormente la galactosa, ya no se podía estimular a las células mediante las lectinas de soja o de cacahuete, pero aún se podía obtener una respuesta a la concanavalina *A*. Estos resultados se pueden explicar suponiendo que los azúcares se hallan situados sobre la superficie del linfocito en una sencuencia que se encuentra en muchas glucoproteínas, con el ácido neuramínico en la punta externa de la cadena, seguido por la galactosa y la manosa; que dicha secuencia forma parte de los lugares receptores, en la membrana celular, de las aglutininas de soja y de cacahuete y de la concanavalina *A*, y que, cuando se realiza la unión en dichos lugares, se desencadena la estimulación mitogénica.

Los experimentos sobre la estimulación de los linfocitos por las lectinas demuestran que es iniciada por unos acontecimientos en la membrana, pero ¿mediante qué mecanismo molecular se hace pasar la señal a través de la membrana? Algunos sugieren que la señal está mediada por la agrupación de receptores en la membrana fluida. Garth L. Nicolson, del Salk Institute, y Tae H. Ji, de la Universidad de Wyoming, han obtenido indicios de la existencia de dichos efectos que se dan a través de la membrana. Trabajaron con membranas de glóbulos rojos, que son más fáciles de preparar que las membranas de linfocitos y sobre las cuales se tienen más conocimientos. La membrana del glóbulo rojo

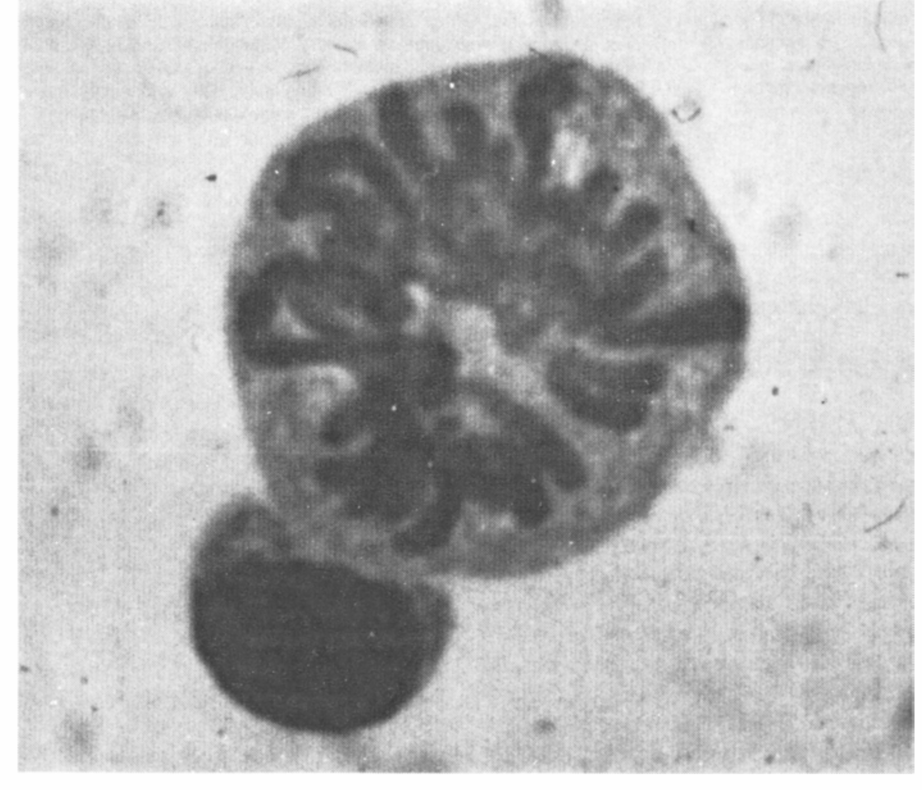
contiene glucoproteínas que, al parecer, abarcan el espesor de su doble capa lipídica, y otras proteínas, principalmente una que se llama espectrina, que se encuentran en su cara interna (citoplasmática). Nicolson y Ji "midieron", en la membrana aislada, la distancia entre moléculas de espectrina adyacentes, intentando unirlas en cadena mediante un agente químico cuya longitud se podía variar. En la membrana aislada, esta unión en cadena no se podía conseguir a no ser que los reactivos de unión tuvieran una longitud aproximada de 11 angstroms. Cuando se intentaba la unión en cadena de la espectrina tras haberse unido las lectinas, como la concanavalina *A* o la aglutinina de ricino, a la superficie externa de la membrana, esta unión en la cara interna se podía conseguir hasta con un reactivo de una longitud de cinco angstroms.

Aún está por ver si son generales estos efectos transmembrana. Si el efecto de agregación de los receptores de lectina sobre la superficie de los linfocitos se transmitiera al interior de la célula mediante glucoproteínas de su membrana, podría darse una redistribución de otras proteínas situadas en la cara interna de la membrana. Estas proteínas internas, al estar en contacto directo con el citoplasma y, a través de éste, con el núcleo, podrían poner en marcha, de alguna manera, la maquinaria celular.

Cuando se estudia la estimulación mitogénica o cualquier otra propiedad de los linfocitos, la tarea siempre es compleja por la gran heterogeneidad de estas células: incluso los linfocitos procedentes de un mismo órgano –por ejemplo, el timo– comprenden varias subpoblaciones que difieren entre sí por sus propiedades y por sus funciones biológicas. Por tanto, es esencial separar a los linfocitos en subpoblaciones homogéneas, si lo que se busca es una correlación entre sus propiedades y su papel biológico y el conocimiento de los mecanismos de su respuesta a diversos estímulos, pero todavía no existen métodos eficaces para separar los linfocitos según su función biológica.

Yair Reisner y Mariana Linker-Israeli, del Weizmann Institute, han demostrado recientemente que posiblemente las lectinas den una solución a este problema. Separaron células de timo de ratón en dos subpoblaciones: una que se aglutinaba con la lectina de cacahuete y otra que no. Se halló que ambas subpoblaciones diferían en sus antígenos superficiales y en su respuesta a la actividad mitogénica de la PHA. La subpoblación de timocitos que no se aglutinaba con la aglutinina de cacahuete era similar, por sus propiedades, a los linfocitos *T* circulantes; concretamente, resultaba activa en las pruebas de rechazo de trasplantes. Tan sólo esta subpoblación que, según se cree, es más madura que la mayoría de los linfocitos de timo, tiene un elevado contenido de ácido siálico en su superficie. Posiblemente la unión del ácido siálico a la superficie celular de los linfocitos sea un paso importante en la maduración de estas células en el timo.

Se han adelantado mucho en el estudio de las lectinas, pero todavía permanecen sin contestación numerosas preguntas referentes a sus propiedades y funciones. Una de las más intrigantes es la siguiente: ¿Qué valor pueden tener las lectinas para los organismos que las producen? ¿Por qué razón habría de poseer un haba de Lima o un caracol una proteína que pueda distinguir entre sí distintos grupos sanguíneos humanos, identificar células malignas de mamíferos y estimular los linfocitos? Hasta ahora no se ha encontrado una respuesta satisfactoria a esta pregunta, pero hace poco ha surgido una posible contestación, de unos estudios realizados en nuestro laboratorio. Reuben Lotan, David Mirelman y yo, con la colaboración de Esra Galun del departamento de genética vegetal del Weizmann Institute, hemos comprobado que la aglutinina de germen de trigo inhibe el crecimiento de algunos hongos que contienen quitina en sus paredes celulares (la quitina es un polímero de *N*-acetilglucosamina). Basándonos en este hallazgo, hemos lanzado la hipótesis de que la aglutinina de germen de trigo protege al trigo frente a los hongos y otros organismos patógenos de los vegetales que contienen quitina, al menos durante el período de la hidratación inicial de la semilla, la germinación y el crecimiento inicial de la joven planta. Quizá las lectinas que posean una especificidad por un azúcar, distinta de la de la aglutinina de germen de trigo, inhiban el crecimiento de otros microorganismos patógenos de vegetales, cuya superficie externa esté constituida por polisacáridos construidos con unidades glucídicas diferentes. Cualquiera que sea el papel de las lectinas en la naturaleza, no hay duda de que seguirán aportando una ayuda importante en el proceso de cartografía del complejo paisaje de las superficies celulares, en el esclarecimiento del papel de los azúcares superficiales en el comportamiento y el crecimiento celulares y, por tanto, en la profundización de nuestra comprensión de la biología de las células malignas y normales.



EL EFECTO MITOGENICO de una lectina se visualiza en esta fotomicrografía de Novogrodsky. Tras una incubación de tres días con concanavalina *A*, un linfocito de bazo de ratón, teñido, ha entrado en la metafase de la mitosis, período durante el cual aumenta de tamaño y sus cromosomas se vuelven estructuras discretas. Al lado del linfocito estimulado, se observa otro no estimulado.

Juegos matemáticos

La noción de número negativo y lo arduo que resulta entenderla

Martin Gardner

Al aprender a hablar, los nombres de los primeros números enteros positivos forman parte tan esencial del vocabulario del niño como "perro", "gato" o "pájaro". Nuestros primitivos antepasados debieron tener una experiencia semejante. Los números usados para contar, llamados también números naturales, fueron sin duda los primeros que por su utilidad exigieron nombre. Actualmente, los matemáticos aplican la palabra "número" a centenares de engendros abstractos muy distantes de la operación de contar.

Se dio un modesto primer paso de ampliación del concepto de "número" al incluir entre ellos las fracciones. Si bien muchos objetos del mundo observable –como ríos, estrellas, vacas, etc.– no se perciben, al menos corrientemente, en forma fraccionaria, es fácil comprender el significado de media manzana o de la tercera parte de 12 ovejas. Pero el paso siguiente, que consistió en aceptar los números negativos, fue tan formidable que los matemáticos no comenzaron a usarlos con la conciencia verdaderamente tranquila hasta el siglo XVII. Todavía hoy muchas personas los manejan con cierta aprensión, como muestra una rima escolar citada por W. H. Auden:

Menos por menos da más;
sin discusión se debe así aceptar.

Es preciso distinguir entre la resta y los números negativos. Ni un niño ni un pastor analfabeto tienen dificultad para restar seis vacas a diez vacas. Una "vaca negativa", sin embargo, es más difícil de imaginar que una vaca fantasma. Una vaca fantasma tiene al menos alguna clase de realidad, pero una vaca negativa es menos real que una vaca nula. Al quitar una vaca a un "rebaño" de una vaca no queda nada; pero sumar una vaca negativa con una vaca positiva –lo que haría que ambas se esfumasen como una partícula subatómica que chocase con su antipartícula– es tan ridículo como el viejo chiste sobre un individuo cuya personalidad era tan negativa que, cuando asistía a una fiesta, los invitados, mirando perplejos en torno a sí, preguntaban: "¿Quién se ha ido?".

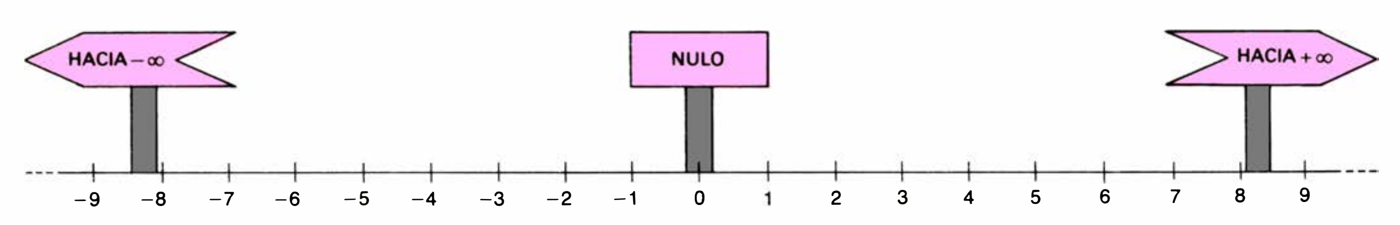
Este fue el punto de vista adoptado por los antiguos griegos. Amantes de la geometría, gustaban de imaginar los entes matemáticos como objetos representables gráficamente. "Números" eran solamente los números naturales y las fracciones de términos positivos, que admiten modelos realizables con piedrecitas o con marcas trazadas en una pizarra. La primitiva álgebra de los griegos no tenía ni cero ni cantidades negativas. Incluso se oponían a llamar número al 1, porque, como dijo Aristóteles, los números miden pluralidades, y el 1 es la unidad de medida, no una pluralidad.

Conviene darse cuenta de que esta actitud se debió, en buena medida, a razones de índole semántica. Los matemáticos griegos sabían que $(10-4)\ (8-2)$ es igual a $(10\times8)-(4\times8)-(2\times10)+(2\times4)$. Reconocer como válida esta igualdad equivale a aceptar implícitamente lo que luego se llamó regla de los signos: el producto de dos números cualesquiera del mismo signo es positivo, y el producto de dos números de distinto signo es negativo. Lo que ocurrió simplemente, es que los griegos no quisieron admitir que $-n$ es un número; para ellos no era sino un símbolo que representaba un sustraendo. De un montón de 10 pueden quitarse dos manzanas, pero quitar 10 manzanas de dos manzanas les parecía evidentemente absurdo. Sabían que si $4x+20=4$, entonces x ha de tener el valor -4, pero se negaban a escribir ecuaciones como ésta porque su solución "no es un número". Por la misma razón, $-\sqrt{n}$ no se admitía tampoco como legítima raíz cuadrada de n.

No es fácil saber exactamente qué pensaban los primitivos babilonios de las cantidades negativas, pero al parecer no les resultaban tan incómodas como a los griegos. Los matemáticos chinos, antes de comenzar nuestra Era, calculaban rápidamente con cuentas de bambú, usándose cuentas rojas *(cheng)* para los números positivos y cuentas negras *(fu)* para los negativos. Estos mismos colores se usaron después para escribir números positivos y negativos. En *Nueve capítulos del arte matemático,* famosa obra del período Han (aproximadamente de 200 a.C. hasta 200 d.C.), se explica la técnica de manejo de las cuentas, y se cree que en ella aparecen por primera vez explícitamente y por escrito los números negativos. Sin embargo, en esa obra no se admiten ni la regla de los signos ni las raíces negativas de los números.

Hasta el siglo VII, en que los matemáticos hindúes comenzaron a utilizar valores negativos en problemas de créditos y deudas, no se desarrolló la aritmética del cero y de los números negativos. No sólo fueron ellos los primeros en usar el cero en sentido moderno, sino que plantearon también ecuaciones con números negativos, que representaban escribiendo un punto o un circulito superpuesto al número. Enunciaron explícitamente la regla de los signos, y admitieron que cada número tiene dos raíces cuadradas, una de ellas positiva y la otra negativa.

En Europa, la mayor parte de los matemáticos renacentistas seguidores de la tradición griega mantenían con respecto a las cantidades negativas una actitud recelosa. Es necesario recordar otra vez que se trataba más de una cuestión se-



La recta numérica de los enteros

mántica que de verdadera incapacidad para comprenderlas. Los algebristas del Renacimiento sabían perfectamente bien cómo manejar raíces negativas; pero preferían llamarlas "raíces ficticias". Sabían perfectamente cómo resolver ecuaciones con números negativos; pero evitaban llamar número a cantidades menores que cero.

Hacia el siglo XVII, unos cuantos matemáticos se habían atrevido ya a modificar el lenguaje y a considerar a los números negativos como números legítimos; pero esta tendencia todavía encontraba resistencia y, en ocasiones, por parte de matemáticos eminentes. Descartes se refería a las raíces negativas como "falsas raíces" y, en opinión de Pascal, era absurdo llamar números a entes menores que cero. Un amigo de Pascal, Antoine Arnauld, demostraba que la noción de número negativo era absurda, razonando así:

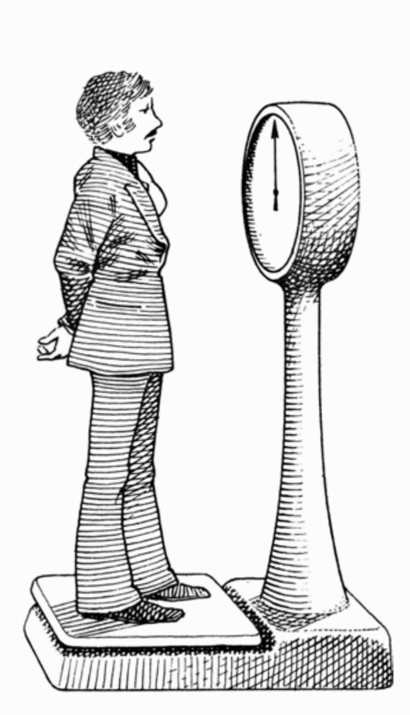
La regla de los signos nos obliga a admitir que $-1/1 = 1/-1$. Si se entiende esta igualdad como la igualdad de dos razones, habremos de afirmar que la razón del menor de dos números al mayor de ellos es igual a la razón del mayor al menor. Como señala Morris Kline en *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times,* esta aparente paradoja fue largamente discutida por los matemáticos renacentistas. Leibniz admitía que era difícil de resolver, aunque defendiendo los números negativos, porque eran símbolos útiles que permitían obtener soluciones correctas.

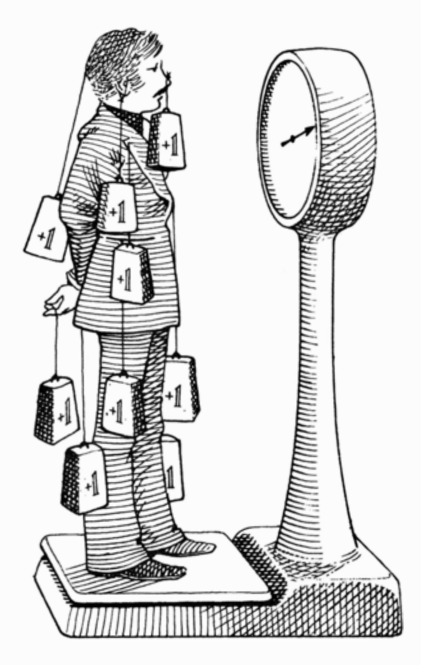
Algunos de los principales matemáticos de los siglos XVII y XVIII –entre ellos, John Wallis y Leonhard Euler– admitían los números negativos, pero creían que eran mayores que infinito. ¿Por qué? Porque $a/0 = \infty$. Así pues, si dividimos a por un número menor que 0, por ejemplo -100, ¿no deberíamos obtener un cociente negativo y mayor que infinito?

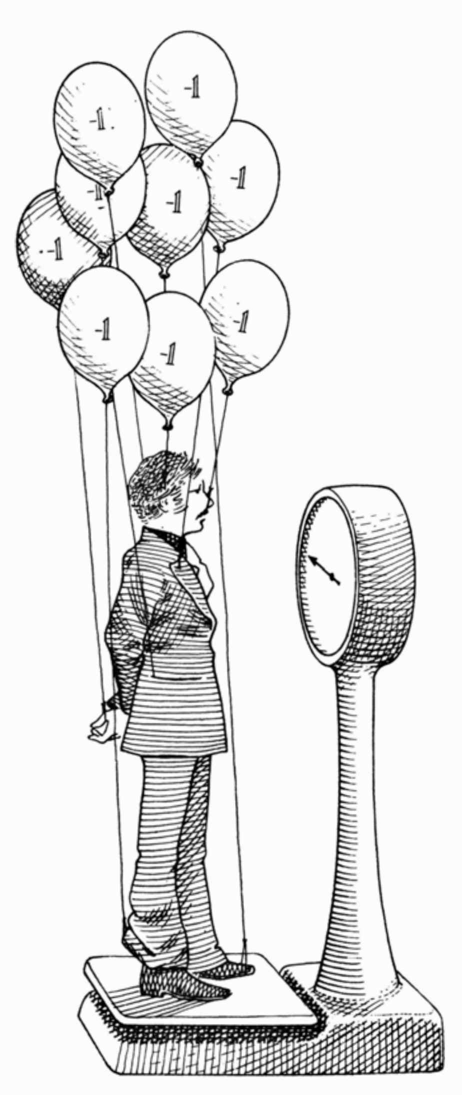
Durante el Renacimiento, los signos de adición y de sustracción sufrieron considerables cambios. Los hoy familiares signos "más" y "menos" se usaron por primera vez en la Alemania del siglo XV como marcas de almacén, para indicar si el contenido de un recipiente pesaba más o menos de lo normal. Ya a comienzos del siglo XVI los matemáticos holandeses usaban + y – como signos de operaciones, costumbre pronto extendida a Inglaterra. La primera obra escrita en inglés que utilizó los signos "más" y "menos" fue un popular texto en aritmética escrito en 1541 por Robert Recorde, médico de Eduardo VI y de la reina María.

Sin embargo, dichos signos no denotaban todavía operaciones. "Esta figura, + representará demasiado, al igual que esta línea, –, llana, sin barra cruzada, representará demasiado poco", explicaba Recorde. En un libro suyo posterior, fue también el primero en usar en Inglaterra el moderno signo de igualdad. "Pondré, como acostumbro en mi trabajo, un par de paralelas... de este modo: =, porque no hay dos cosas que puedan ser más iguales".

En el siglo XVIII, los números negativos, caracterizados por el signo menos, se usaban regularmente en todo el mundo para el cálculo algebraico. No obstante, para la mayor parte de los matemáticos







Modelo descriptivo de la regla de los signos

la cuestión distaba de estar elucidada por completo. Muchos textos presentaban rebuscadas justificaciones de la regla de los signos; algunos autores llegaban incluso a efectuar en las ecuaciones prolijas transformaciones para no tener que multiplicar dos números negativos. He aquí un pasaje de *Dissertation on the Use of the Negative Sign in Algebra* (1758) (Discurso sobre el uso algebraico del signo negativo), por el barón Francis Masères, jurista británico que actuó como fiscal general en Quebec:

"Una cantidad única nunca puede... considerarse como afirmativa o negativa: pues si una cantidad única como *b* se marca, ya sea con el signo +, ya con el signo –, sin asignarle otra cantidad, como *a*, a la cual ha de sumarse o sustraerse, la marca carece de sentido y significado. Por consiguiente, si se dice que el cuadrado de – 5... es igual a +25, tal aseveración, o bien tiene que significar sólo que 5 veces 5 son 25, sin tener para nada en cuenta los signos, o bien debe considerarse como un puro disparate, como un galimatías ininteligible".

Este párrafo está citado por Augustus De Morgan, en *A Budget of Paradoxes.* Masères, nos cuenta De Morgan, era un abogado tan honesto que no podía soportar que uno de sus clientes saliera victorioso si él lo consideraba culpable. Consecuentemente, escribe De Morgan, su bufete fue gradualmente decayendo.

El durísimo ataque que, pocas páginas antes, De Morgan dirige a *The Principles of Algebra* (Los principios de álgebra) debió levantar ampollas a su autor, William Frend, antiguo clérigo que, casualmente, era suegro de De Morgan. (Frend sufrió una sonada expulsión de Cambridge por sus opiniones unitaristas, que se convirtió en "causa célebre" de la que fueron apasionados paladines Samuel Taylor Coleridge y Joseph Priestley.) La obra de Frend, en dos volúmenes, fue probablemente el más ambicioso texto de álgebra jamás escrito en el que cero y todos los números negativos eran tal mal acogidos como lo era Frend en Cambridge.

De Morgan transcribe completamente una hilarante parodia que Frend hace de Rabelais; en ella, Pantagruel da una desmelenada lección sobre la inutilidad del cero. En una quejosa nota al pie de página se cita a la Sra. De Morgan: "La claridad mental y el carácter directo y abierto (de mi padre) pudieron ser causa de su herejía matemática, su repulsión a usar cantidades negativas en las operaciones algebraicas; y es probable que de este modo se privase de un instrumento de trabajo cuyo uso podría haberle llevado a mayor eminencia en las más altas ramas".

¿Cómo es posible hacer álgebra sin usar números negativos? Ante todo, es preciso evitar ecuaciones que conduzcan a un número negativo de objetos reales, o que les asigne magnitudes negativas. Incluso cuando una ecuación conduzca a solución positiva correcta, es necesario escribirla de modo que las incógnitas nunca tomen valores negativos. Por ejemplo: Si la madre tiene 29 años y su hija 16, ¿cuándo tendrá la madre el doble de la edad de su hija? Podríamos plantear el problema en la forma $29+x=2\,(16+x)$, y descubrir, quizás con sorpresa, que $x=-3$.

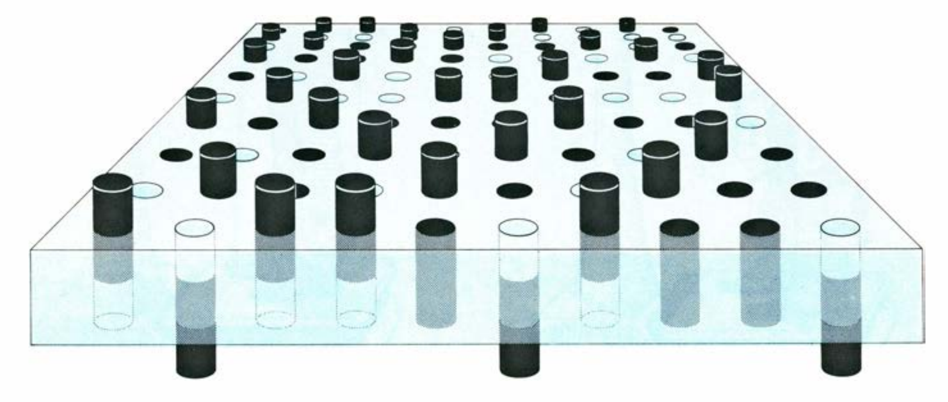
Este resultado nos da la respuesta correcta: La madre *tuvo* doble edad que su hija hace tres años, cuando tenía 26 años y su hija 13. Si a un algebrista del siglo XVIII, le hubiesen repugnado los números negativos, hubiera transformado la ecuación en $29-x=2\,(16-x)$, evitando de esta forma el valor –3. En la nueva ecuación x toma el valor aceptable 3, que evidentemente conduce al mismo resultado que antes.

En siglos pasados, lo mismo que hoy en las clases de álgebra de principiantes, el principal tropiezo para aceptar los números negativos ha sido "ver" por qué motivo el producto de dos números negativos ha de ser positivo. Positivo por positivo no ofrece dificultad. Si se ponen tres pares de naranjas en el frutero vacío, el frutero contendrá seis naranjas. Positivo por negativo comienza ya a resultar misterioso, pero no es difícil de comprender si se le concede realidad a la noción abstracta de naranja negativa. Si se ponen en el frutero tres pares de naranjas negativas se tendrán seis naranjas negativas. Pero, ¿qué significado pueden tener multiplicar por –3 dos naranjas negativas? Para empezar, se tienen dos naranjas fantasmagóricas, o sea, menos que nada, y después se les hace algo negativo. ¿De dónde salen las seis auténticas naranjas? Al parecer, se materializan en el frutero por arte de magia.

Las explicaciones a base de paseos sobre una recta gradual numéricamente, como se muestra en la figura de la página 110, no aclaran mucho las cosas a los principiantes. Es fácil identificar los enteros positivos con las marcas unitarias situadas a la derecha del cero, y los negativos, con las situadas a la izquierda. Sumar es desplazarse hacia la derecha, y restar, ir hacia la izquierda. Para multiplicar 2 por 3 se repite tres veces un desplazamiento de dos unidades hacia la derecha, con lo que se llega a 6. Para multiplicar –2 por 3 efectuamos tres desplazamientos sucesivos de dos unidades hacia la izquierda, con lo que se llega a –6. Pero, ¿cómo hacer –2 veces –3? ¿Qué clase de fuerza paranormal nos transporta bruscamente desde la izquierda de 0 hasta 6 unidades a su derecha?

Es fácil disculpar a los matemáticos de siglos anteriores por considerar absurda la noción de número negativo. En realidad, el proceso no se comprendió plenamente sino hasta que se definieron cuidadosamente las estructuras abstractas de grupo, anillo y cuerpo. No es este lugar para exponerlas, por lo que me contentaré con señalar que cuando los matemáticos vieron necesario ampliar la noción de número, e incluir entre ellos al cero y los números negativos, exigieron que los nuevos números tuvieran un comportamiento lo más parecido posible a los ya conocidos.

Uno de los axiomas fundamentales de la aritmética originaria es la ley distributiva, que enuncia que $a(b+c)=ab+ac$; por ejemplo, $2(3+4)=(2\times3)+(2\times4)$. Si se sustituyen 2 y 3 por sus opuestos negativos, para que la igualdad siga siendo válida es preciso admitir la regla de que el producto de dos números negativos es positivo. Si el producto fuese negativo, la igualdad se convertiría en la contracción: $-2=-14$. Con terminología moderna, los enteros forman un "anillo", que es cerrado frente a las operaciones



Modelo de la regla de los signos mediante conmutadores

de adición, sustracción y multiplicación, lo que significa que al sumar, restar o multiplicar de cualquier modo dos enteros, cualquiera sea el signo de los mismos, el resultado siempre es un entero. Todas las leyes conocidas de la aritmética de enteros positivos continúan siendo válidas, y no se encuentran nunca contradicciones. (La división no es siempre posible, porque podrían obtenerse fracciones, y las fracciones no son elementos del anillo.)

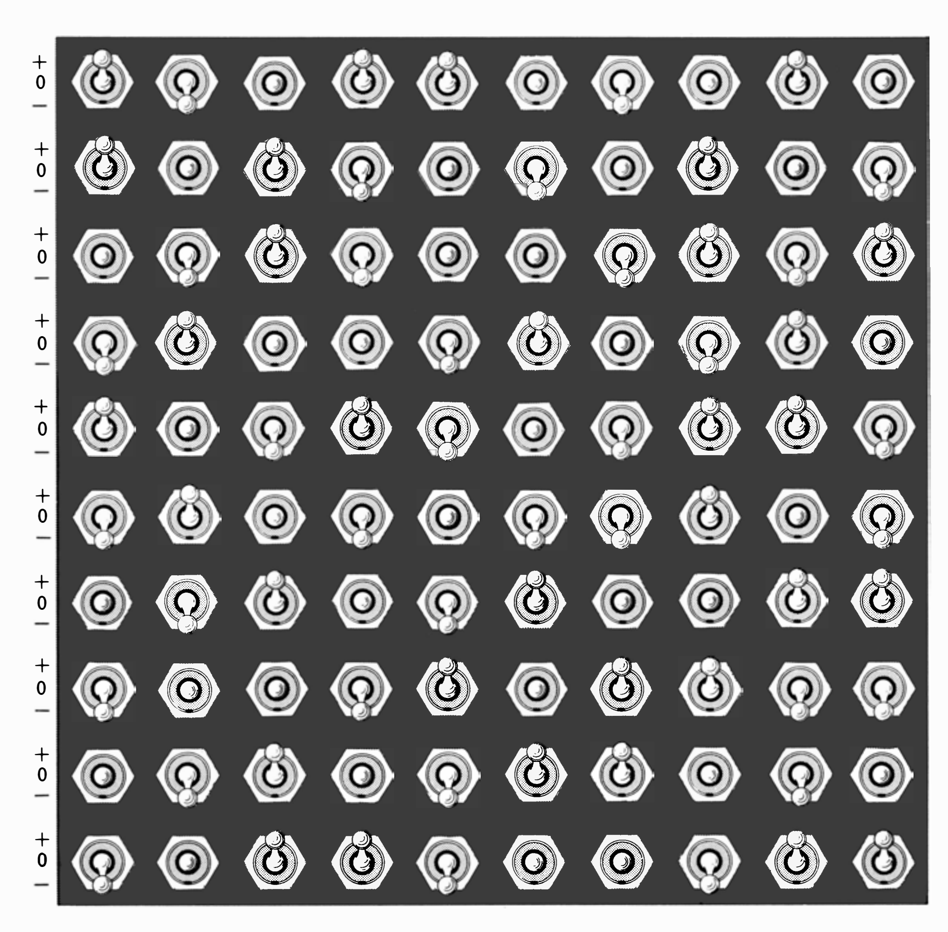
Por consiguiente, no es correcto decir que los matemáticos pueden "demostrar" que el producto de dos números negativos es positivo. Más bien se trata de un convenio relativo a las reglas necesarias para que los números negativos obedezcan a las antiguas reglas para contar números. Si se incluyen, además, las fracciones de términos enteros, el anillo se amplía a "cuerpo", que es cerrado para las cuatro operaciones aritméticas.

A pesar de que no exista "demostración" de que $-2 \times -3 = 6$, no es difícil imaginar casos en los que la regla de los signos se aplique a situaciones reales. En realidad, es aplicable a todos los casos en que intervengan números de una escala graduada en dos direcciones o sentidos: este y oeste, arriba y abajo (como en el termómetro), adelante y atrás en el tiempo (o en sentido horario o antihorario, como en el reloj), ganancias y pérdidas, y varios cientos de ejemplos más. En razón de estas aplicaciones, se dice a veces que los "números con signos" son "números dirigidos".

Al aplicar a estos ejemplos la regla de los signos es necesario distinguir siempre entre las cantidades y las operaciones que con ellas se realicen. Esta distinción es particularmente necesaria al multiplicar una cantidad con signo por un número negativo. Es fácil comprender el significado de tomar n veces una cantidad positiva o negativa, pero, ¿qué significa tomarla $-n$ veces? Para pensar con claridad en esta operación misteriosa, lo mejor es descomponerla en dos pasos:

1. Repetir la cantidad n veces.
2. Transformar el resultado en su contrario respecto de cero; o sea, cambiar su signo.

En la recta numérica, el segundo de estos pasos puede imaginarse como una reflexión o simetría respecto de un espejo situado en la marca cero. Imaginemos un pulgón situado en -2. No hay dificultad en multiplicar su posición por 3. Basta repetir tres veces -2, y llevarlo a -6. Pero si el pulgón se encuentra en 2, y se desea multiplicarlo por -3, el proceso consiste



El clavijero, modelo de la teoría partícula-antipartícula

en repetir tres veces 2, situando el pulgón en 6, y luego llevarlo a su opuesto. Este proceso transporta el pulgón a la imagen especular de 6, que es -6. Si el pulgón se encuentra en -2, para multiplicar por -3 se opera de igual forma. Repetiremos -2 tres veces, llevándolo a -6, y la simetría lo lleva finalmente a 6.

Aunque el procedimiento anterior puede parecer cosa de brujería en la recta numérica, es perfectamente normal al aplicarlo a otras muchas situaciones. Supongamos que un jugador pierde diariamente 10 dólares en el juego. El tiempo transcurre positivamente hacia el futuro, y negativamente hacia el pasado. Dentro de tres días, el jugador habrá perdido 30 dólares ($3 \times -10 = -30$). Hace tres días, tenía 30 dólares más que hoy ($-3 \times -10 = 30$). Se plantean situaciones equivalentes en cualquier escala orientada. Si el nivel de un depósito de agua desciende a razón de tres centímetros por segundo, hace dos segundos el nivel estaba $-3 \times -2 = 6$ centímetros más alto. Si el pulgón se desplaza hacia el oeste a razón de tres centímetros cada segundo, hace dos segundos estaba $-3 \times -2 = 6$ centímetros más al este de su posición inicial.

El peso es la propiedad más usual de los cuerpos que se presta a tomar valores negativos. Metiéndose en el bolsillo pesas de un gramo se es más pesado. Atándose al cuerpo globos de helio, cada uno de fuerza ascensional de un gramo, se es más ligero. Quitándose tres pares de globos, el peso aumenta en $-3 \times -2 = 6$ gramos.

"Imaginemos una ciudad, en la que entran y de la que salen gentes buenas y personas malvadas", ha escrito Roy Dubisch (*The Mathematics Teacher*, diciembre de 1971). "Evidentemente, una persona buena es un + y, una malvada, un −. Es igualmente obvio que una persona buena que venga a la ciudad es un + para la ciudad; una persona buena que se vaya, es un −; una mala que se traslada a ella, un −; y, finalmente, una mala que abandona a la ciudad, representa un +".

Si tres pares de malvados se marchan de la ciudad, la ciudad gana $-2 \times -3 = 6$ puntos. El ejemplo puede materializarse con fichas de dos colores y un plato que represente la ciudad.

Se han presentado otros modelos para enseñar a los niños la operatoria del anillo de los números enteros. Ofrezco aquí uno de mi propia cosecha, tan sencillo que sin duda se les habrá ocurrido antes a otros. Consiste en un tablero

cuadrado de un centímetro de grosor, en el que se perforan 100 orificios formando un cuadro. En cada agujero se inserta una clavija o vástago de un centímetro de longitud. Estas clavijas pueden hallarse en tres posiciones respecto del tablero: enrasadas con él (0), sobresaliendo por arriba medio centímetro (+1), o sobresaliendo medio centímetro por debajo (–1). Si todas las clavijas están enrasadas, el tablero tiene estado 0. Si sobresalen por arriba k clavijas, su estado es k; si hay k hundidas, su estado es $-k$.

Para sumar n al estado del tablero, se empujan hacia arriba n clavijas, comenzando siempre, si las hay, por las clavijas hundidas, antes de mover las enrasadas. Para restarle n al estado del tablero, se hunden n clavijas, empezando por las sobresalientes, si las hay.

Para multiplicar por n el estado del tablero, se repite n veces dicho estado como sumando. Si el tablero marca 0, no hay nada que hacer. Si hay k señales prominentes, se suben n–1 conjuntos más de k clavijas cada uno. Si hay k marcadores hundidos, se hunden otros n–1 juegos de k pasadores. Para multiplicar por $-n$, se multiplica primero por n, como acaba de explicarse, y después se le da la vuelta al tablero.

Posiblemente sea más fácil construir otro modelo, a base de pequeños conmutadores de tres posiciones: arriba (+1), central (0) y abajo (–1). En este caso, al multiplicar por un número negativo se termina girando el tablero 180 grados.

Es probable que si Aristóteles estuviera vivo y dispusiera de 20 años para dedicarse al estudio del álgebra moderna, prefiriese todavía llamar "números" a los naturales mayores de 1. (En cierto sentido, todos los "números artificiales" no son más que construcciones de los números naturales.) Pero ésta es una consideración nominalista que no conduce a nada. Lo que importa es que los anillos y cuerpos, en los que cada elemento tiene asociado un gemelo opuesto, o negativo, son aplicables a una gran variedad de objetos y fenómenos naturales.

Podemos meternos en líos serios intentando aplicar números negativos y la regla de los signos a cubos y otros "objetos" del mundo real. A veces, tal aplicación resulta sorprendentemente acertada. Dejando de lado la radiación, el clavijero no es mal modelo de la famosa teoría de P. A. M. Dirac sobre partículas y sus antipartículas, teoría que predijo la existencia del positrón.

Una de las preguntas del mes pasado se refería al juego de los tres hombres, tres sombreros rojos y dos sombreros negros. Los hombres están sentados en sillas, de modo tal que A ve a B y a C, B solamente ve a C, y C no ve a ninguno de los otros. Un árbitro les coloca tres sombreros, extraídos del total de cinco. Se le pregunta a cada uno de los hombres, en el orden A, B, C, si sabe el color de su sombrero. ¿Habrá uno de ellos que siempre diga sí?

En efecto. Al analizar todas las combinaciones de colores se observa que si los sombreros de A, B y C son, por ese orden, *RRR*, *RNR*, *NRR*, o *NNR*, entonces C contestará afirmativamente. Cuando el orden sea *RRN* o *NRN*, podrán contestar B y C. Si es *RNN*, todos dirán que sí.

El análisis precedente se generaliza para n personas, n gorros rojos y n–1 gorros negros. Supongamos que $n = 4$. El "ciego", D, puede razonar así: "Si mi sombrero fuera negro, los otros tres, al verlo, sabrían que sólo quedan dos sombreros para ellos. Se tendría el caso precedente, ya resuelto. Si nadie contesta "sí", es que mi sombrero es rojo; diré pues que sí sé el color de mi sombrero". Análogamente puede razonarse para cualquier valor de n. El primero que puede contestar "sí" es siempre el primero de los interrogados que, llevando sombrero rojo, no ve sombreros rojos en ninguno de los demás.

John Erbland, estudiante de matemáticas de la Northeastern University ha concebido una divertida variante. Supongamos que haya n personas, n–1 sombreros negros y solamente un sombrero rojo. Se procede como antes. ¿Podrá siempre contestar "sí" el portador del chapeo rojo? De no ser así, ¿en qué posiciones podrá conocer él de qué color es su sombrero? Este problema se analizará el mes próximo.

El problema de los jugadores consecutivamente numerados puede analizarse del modo siguiente: denotaremos con A al jugador que lleve el número más alto, con B al que lleve el más bajo, y Pn será el ordinal de la pregunta.

Supongamos que los números sean 1 y 2. Si se preguntase primero a A, su respuesta a $P1$ sería "sí". Si se preguntase primero a B, éste diría que no. Entonces A, que ve un 1 en B, respondería afirmativamente a $P2$.

Supongamos que los números sean 2 y 3. Preguntándole primero a A, dirá que no. También B diría que no. Al responder así, B pondría de manifiesto que no ve un 1 en la frente de A, por lo que A sabría que su número es 3, y contestaría afirmativamente a $P3$. Preguntándole primero a B, dirá que no. Igual que antes, esta respuesta de B le dice a A que su número es 3, por lo que contestará "sí" a $P2$.

Supongamos que los números sean 3 y 4. Preguntado A en primer lugar, contestará negativamente. También B dirá que no. Ahora A puede razonar así: "Si llevo un 2, el juego se reduce al caso anterior, con 2 y 3, y siendo B interrogado en primer lugar. Así que B contestaría afirmativamente a $P2$. Como B ha dicho que no, necesariamente llevo un 4". Por consiguiente, A contesta afirmativamente a $P3$. Si se le pregunta primero a B, contestará que no. También A contesta negativamente a $P2$, con lo que estamos en el caso anterior, como antes. La respuesta negativa de B a $P3$ permite a A saber que tiene un 4, por lo que contestará que sí a $P4$.

Procediendo de este modo, el problema puede reducirse siempre al del caso anterior. Sea n el número más alto. A gana siempre. Interrogado en primer lugar, gana en $P(n-1)$ si n es par, y en Pn si n es impar. Interrogado en segundo lugar, gana en Pn si n es par y en $P(n-1)$ si n es impar. Obsérvese el curioso hecho de que conviniendo en que los jugadores contesten afirmativamente sólo cuando estén seguros de llevar el número más *bajo*, el juego no termina jamás.

Discutamos ahora la aparente paradoja. En el caso de las tres personas, todas con sombrero rojo, es cierto que tanto B como C saben de antemano que A dirá que no. Pero – y es fácil no tener en cuenta este hecho crucial– C no sabe, antes de que se formule la primera pregunta que B sabe que A dirá que no. Antes de comenzar el interrogatorio, la información disponible para C no le permite descartar que su sombrero sea negro. Si así ocurriera, B no tendría forma de saber si A va contestar "sí" o "no". Antes de que A diga que no, C no sabe que B sabía ya, por adelantado, que la respuesta de A tendría que ser "no". Por consiguiente, la primera pregunta aporta información esencial para el razonamiento de C, aunque éste sepa *a priori* cuál será la respuesta de A.

Una vez comprendida esta relación, no es difícil ver cómo se resuelven las paradojas de los juegos de Gale y de Conway. Imagínese que es un jugador del juego de Gale. Cada nuevo "No" de un juego de longitud arbitraria aporta nueva y necesaria información de la forma general "Ahora yo sé que tú sabes que yo sé... que tú no sabes mi número". Lo mismo puede decirse del juego de Conway.

Cada "No" proporciona a cada jugador parecida información acerca de lo que saben los restantes.

Taller y laboratorio

El campo eléctrico de la tierra aporta energía a los motores electrostáticos

C. L. Stong

Nadie puede fabricar un móvil perpetuo, pero cualquiera puede emplear el campo eléctrico de la tierra para hacer funcionar ininterrumpidamente un motor casero. El campo existe en la atmósfera, entre la superficie de la tierra y la ionósfera, siendo su potencial eléctrico de alrededor de 360.000 voltios. La energía almacenada se estima entre un millón y mil millones de kilovatios.

Es esta una forma de energía que no puede utilizarse para alimentar, directamente, un motor eléctrico ordinario. Tales motores desarrollan un par mecánico mediante la interacción de campos magnéticos generados por una corriente eléctrica de gran intensidad y baja tensión, como lo demostró Michael Faraday en 1821. El campo de la tierra suministra una corriente continua de intensidad relativamente pequeña, a alta tensión; esta corriente es ideal para hacer funcionar los motores electrostáticos, similares en principio a la máquina inventada por Benjamin Franklin en 1748.

Los motores de este tipo están basados en las fuerzas de atracción entre cargas eléctricas de distinto signo y las de repulsión entre cargas del mismo signo. La energía del campo puede obtenerse mediante una antena sencilla, en forma de conductor vertical, que esté provista de una o varias puntas agudas en su extremo superior. Con buen tiempo, y para alturas de hasta unos cientos de metros, el potencial de la antena aumentará a razón de 100 voltios por cada metro de distancia vertical entre las puntas y la superficie de la tierra. A alturas mayores la tasa de aumento del potencial es menor. Cuando se producen tormentas locales el potencial captado por la antena puede ser de miles de voltios por metro. Una hipótesis meteorológica es que el campo lo mantienen, principalmente, las tormentas, ya que éstas arrancan electrones del aire y lo inyectan dentro de la tierra por medio de rayos, que alcanzan la superficie de ésta con una tasa de 200 descargas por segundo como promedio.

¿Por qué no explotar este campo para complementar las fuentes de energía convencionales? Antes deben vencerse algunas limitaciones. Por ejemplo, una punta aguda sencilla puede atraer carga eléctrica del aire que la rodea con una intensidad de alrededor de una millonésima de amperio, solamente. Podría esperarse que una antena que conste de una sola punta situada en lo alto de un hilo de 18 metros suministrase alrededor de un microamperio a 2000 voltios; la potencia equivalente es 0,002 vatios. Puede preverse que un globo, tachonado de puntas, sujeto mediante un hilo a una altura de 75 metros proporcionará 0,075 vatios. Una limitación importante aparece cuando la altura de la antena excede de unos 200 metros. Las tensiones correspondientemente mayores se hacen difíciles de mantener confinadas.

A una altitud de 200 metros la antena debería captar unos 20.000 voltios. El aire conduce razonablemente bien a esta tensión. En la naturaleza se encuentran materiales magnéticos eficientes, tales como el hierro, el níquel, y el cobalto, que explican por qué la industria de la energía eléctrica se ha desarrollado en base a la dinamo magnética de Faraday. No existen, sin embargo, sustancias aislantes de una eficacia comparable que permitan aislar las altas tensiones que se requerirían en una máquina electrostática de potencia comparable. A pesar de ello, los motores electrostáticos, que son considerablemente más fáciles de construir que los electromagnéticos, pueden encontrar aplicación en casos especiales, tales como aquellos en los que el magnetismo deba excluirse o cuando se trate de suministrar una potencia pequeña a aparatos instalados en lugares remotos, sin operarios, utilizando el campo terrestre.

Aparte de sus posibles aplicaciones, los motores electrostáticos constituyen juguetes fascinantes. En los últimos años, Oleg D. Jefimenko y sus alumnos, de la Universidad de West Virginia, los han estudiado extensamente. El grupo ha reconstruido los modelos de motores de Franklin y desarrollado máquinas electrostáticas avanzadas de otros tipos.

Aunque Franklin no dejó planos de su motor, su descripción del mismo, en una carta a Peter Collison, miembro de la Royal Society, ha permitido a Jefimenko reconstruir un modelo capaz de funcionar *(véase la ilustración que está en la página opuesta)*.

La máquina consiste, esencialmente, en una rueda sin llanta que gira en un plano horizontal sobre cojinetes con un bajo coeficiente de rozamiento. Cada rayo de la "rueda eléctrica", como Franklin denominaba a la máquina, consiste en una varilla de vidrio con un dedal de bronce en su punta. Para accionar el motor se almacenaba una carga electróstatica en botellas de Leyden. Una botella de Leyden es una versión primitiva de un condensador moderno de alta tensión. Franklin cargaba sus botellas con un generador electrostático.

Los terminales de alta tensión de dos o más botellas de Leyden, que poseían cargas de polaridad opuesta, se situaban de manera que fuesen rozados por los dedales situados en lados opuestos de la rueda giratoria. El motor se arrancaba a mano. A partir de esto, desde cada terminal saltaba una chispa de alta tensión a cada dedal que iba pasando y le transmitía una carga de la misma polaridad que la del terminal. La fuerza de repulsión entre cargas del mismo signo impartía un momento de fuerza a la rueda.

Recíprocamente, los dedales eran atraídos por los electrodos, con carga de distinto signo, de la botella de Leyden que Franklin colocaba en el lado opuesto de la rueda. A medida que los dedales rozaban esa botella, una nueva chispa volvía a transferir carga, esta vez de polaridad opuesta. Los dedales resultaban así empujados y atraídos simultáneamente por los terminales de alta tensión del modo necesario para acelerar la rueda.

Franklin no estaba totalmente satisfecho de su motor. La razón era porque, para hacerlo funcionar, se requería, en sus propias palabras, "una fuerza ajena, a saber, la de las botellas". Hizo una segunda versión de la máquina sin las botellas de Leyden.

En este diseño, el rotor consistía, prin-

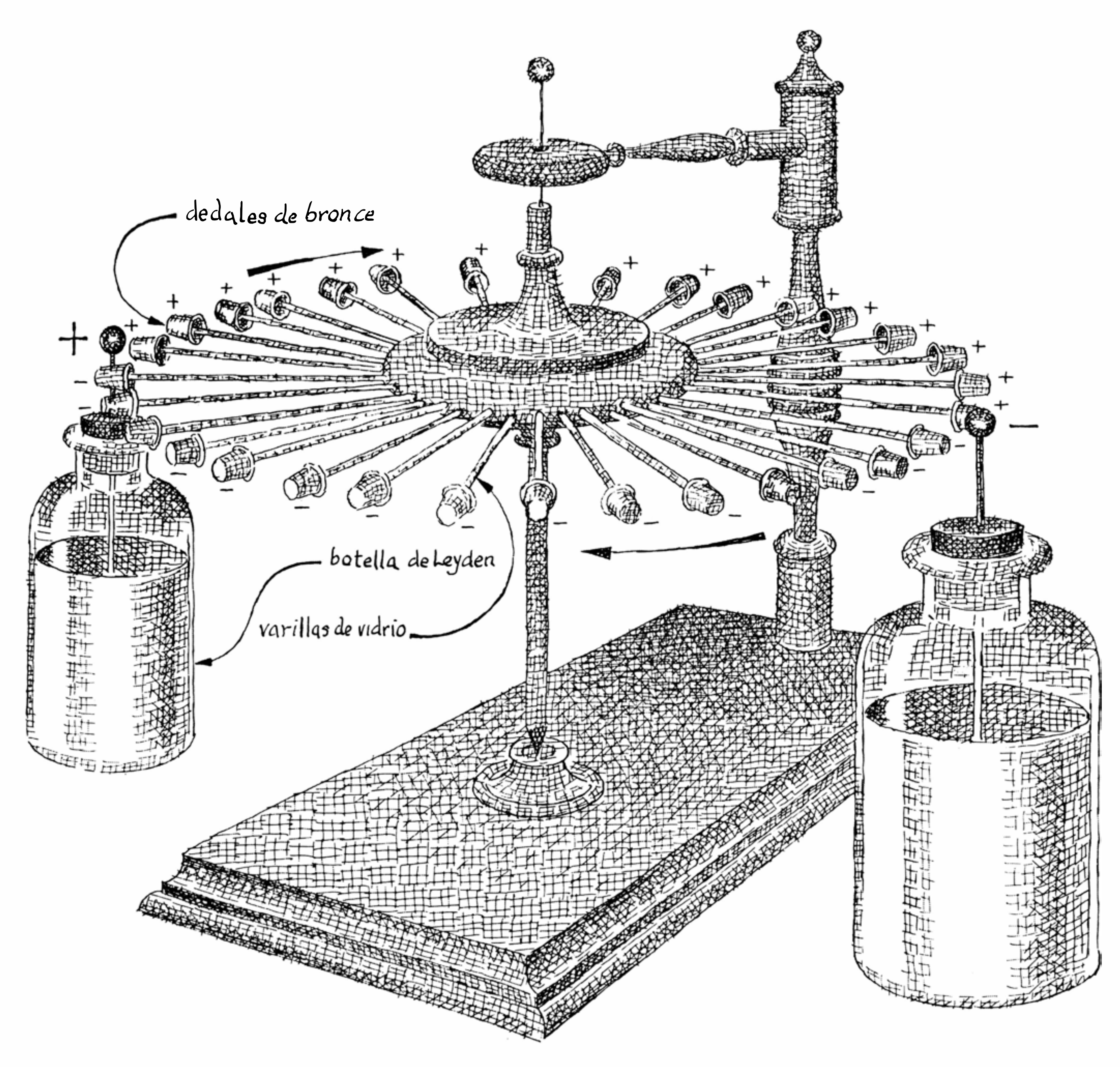
cipalmente, en un disco de vidrio de 43 centímetros de diámetro, montado sobre cojinetes de escaso rozamiento, y que giraba en un plano horizontal. Ambas caras del disco estaban cubiertas de una película de oro, excepto en una región cercana al borde. El rotor estaba construido de forma muy parecida a la de un moderno condensador de armaduras planas.

Doce esferas equidistantes, cementadas al borde del disco, estaban conectadas alternativamente a las películas de oro de las caras superior e inferior. Doce dedales fijos, sostenidos por columnas aislantes, se distribuían alrededor del disco, de forma que rozasen las esferas giratorias de metal. Cuando Franklin cargaba con signo contrario las capas de oro superior e inferior e impulsaba el rotor, la máquina funcionaba tan bien como la de su primer diseño y por las mismas razones. Según Franklin, esta máquina alcanzaba las 50 revoluciones por minuto y funcionaba durante 30 minutos con una sola carga.

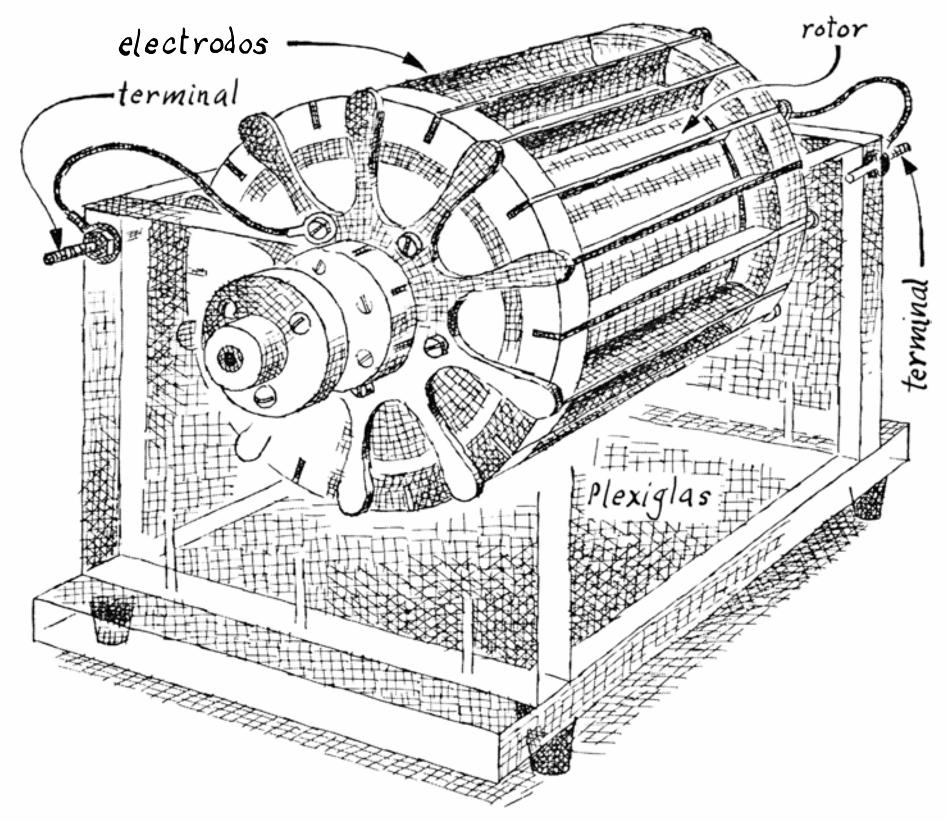
Jefimenko da a ambos motores una carga inicial empleando un generador de 20.000 voltios. Su consumo de corriente es de alrededor de una millonésima de amperio cuando funcionan a toda velocidad. Este consumo equivale a 0,02 vatios, que es la potencia requerída para levantar un peso de 20 gramos a una altura de 10 centímetros en un segundo.

Jefimenko se preguntaba si el motor de Franklin no podría hacerse más potente. Como él mismo explica, la fuerza puede aumentarse añadiendo electrodos fijos y móviles. Esta estratagema está limitada por el espacio disponible. Si los electrodos se sitúan demasiado próximos, tienden a saltar chispas entre ellos, a lo largo del rotor, produciéndose así de hecho un cortocircuito de la máquina. Como alternativa, el rotor podría hacerse cilíndrico para que llevase electrodos en forma de largas bandas o placas. Este dispositivo podría, tal vez, aumentar 1000 veces la potencia de salida.

Repasando la historia de las máquinas electrostáticas, Jefimenko encontró, por casualidad, un artículo publicado en 1870 por Johann Christoff Poggendorff, físico alemán. Describía un motor electrostático provisto de un rotor sin electrodos. La máquina consistía en un



Motor electrostático de Benjamín Franklin



Motor de efecto corona de Oleg D. Jefimenko

disco de vidrio, sin ningún revestimiento, que giraba en el plano vertical, sostenido por cojinetes de baja fricción, entre dos cruces opuestas de ebonita. Cada brazo aislante de las cruces sostenía una hilera, en forma de peine, de puntas de agujas finas que rozaban el vidrio.

Cuando peines opuestos de caras opuestas del vidrio se cargaban con polaridad de distinto signo a potenciales superiores a los 2000 voltios, el aire próximo a las puntas de ambos lados del vidrio se ionizaba. Un brillo azulado rodeaba las puntas, que emitían un leve sonido siseante. El fenómeno, llamado fuego de San Telmo o bien efecto corona, depositaba cargas estáticas a ambos lados del rotor.

Casi toda la superficie del vidrio adquiría una capa de cargas fijas positivas o negativas, dependiendo de la polaridad de los peines. Las fuerzas de atracción y repulsión entre el vidrio así cargado y los peines eran considerablemente superiores a las que aparecían en los dedales cargados de Franklin. Las fuerzas eran también más regulares ya que las distancias entre los peines y las áreas cargadas permanecían constantes. Debe observarse que los peines adyacentes, en el mismo lado del vidrio, soportan cargas de polaridad opuesta, de tal forma que las fuerzas resultantes de atracción y repulsión actúan al unísono para impartir un momento al disco, tal como lo hacían en el caso del motor de Franklin.

Poggendorff continuó experimentando y llegó a saber que debía inclinar los dientes de los peines para depositar las cargas sobre el vidrio a cierto ángulo. La fuerza asimétrica resultante hacía que el motor fuese unidireccional y de arranque automático. Cuando los dientes estaban perpendiculares a la superficie del vidrio las fuerzas eran simétricas, al igual que en el motor de Franklin. Cuando la máquina se arrancaba a mano andaba igual de bien en cualquier dirección.

Poggendorff estaba inmensamente complacido por la eficiencia con que su máquina convertía carga en movimiento mecánico. Concluyó su artículo con una referencia algo despectiva al dispositivo de Franklin. "Tal cantidad de electricidad debe producir una fuerza mucho mayor que la que se produce en el asador eléctrico (de Franklin)", escribía, "como es totalmente obvio y, actualmente, no lo negaría ni el mismo Franklin. Con un grano de pólvora no se puede lograr lo mismo que con cuarenta kilos".

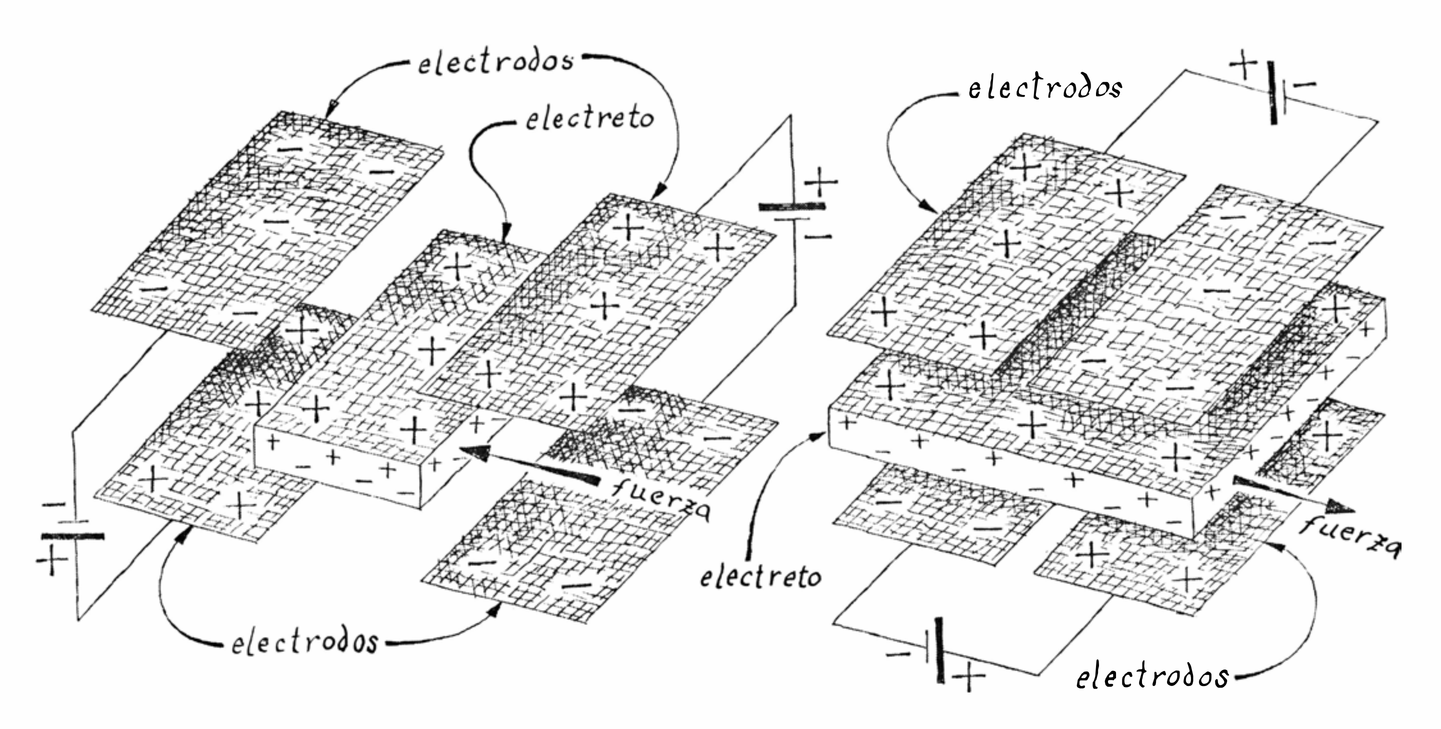
Los motores electrostáticos se clasifican ahora, en general, por el procedimiento mediante el cual la carga se almacena en la máquina o se transfiere al rotor. La máquina de Poggendorff pertenece al tipo de las de efecto corona, que son las que más atención han atraído en los últimos años. Aunque su eficiencia medida es mayor del 50 por ciento, Poggendorff lo consideraba tan sólo como un aparato para investigar los fenómenos eléctricos. Escribía que "sería una vana esperanza la de quien quisiese creer que con él podría obtenerse algún efecto mecánico útil".

La actitud negativa de Poggendorff hacia la utilidad de su diseño pudo muy bien retrasar su desarrollo ulterior. Una versión moderna de la máquina, construida en el laboratorio de Jefimenko, tiene una potencia de alrededor de 0,1 CV. Funciona a velocidades de hasta 1200 revoluciones por minuto, con una eficiencia bastante mayor que el 50 por ciento. Uno de los modelos del moderno motor de efecto corona consiste en un cilindro de plástico que gira alrededor de un eje y va instalado dentro de un conjunto concéntrico, formado por electrodos de bordes afilados que distribuyen carga sobre la superficie del cilindro *(véase la ilustración superior de esta página)*. Las fuerzas que actúan entre las cargas distribuidas y los electrodos imparten un momento al cilindro.

tambor de plástico

tambor de plástico forrado con metal

Electrodos convencionales (**izquierda**) *y electrodos mejorados* (**derecha**)



Motor de electreto de A.N. Gubkin (**izquierda**) *y motor de efecto de ranura* (**derecha**)

Pueden fabricarse máquinas de esta clase con casi cualquier material dieléctrico barato, como son los plásticos, la madera y hasta el cartón. Las únicas partes que han de ser metálicas son los electrodos y sus terminales de interconexión valiendo incluso delgadas hojas metálicas soportadas por cualquier dieléctrico rígido. El eje puede construirse de plástico y girar sobre cojinetes neumáticos. Recurriendo a tales estratagemas los experimentadores pueden proyectar motores extremadamente livianos en relación a su potencia. Los motores de efecto corona no necesitan escobillas ni conmutadores. Se necesita, sin embargo, un potencial de al menos 2000 voltios para iniciar las descargas en corona en los afilados electrodos.

J. D. N. Van Wyck y G. J. Kühn, de Africa del Sur, exhibieron en 1961 una versión más pequeña y más simple de la máquina. Este motor consistía en un disco de plástico de alrededor de tres milímetros de espesor y 40 milímetros de diámetro, sostenido en el plano horizontal por un eje delgado que giraba sobre cojinetes de rubí. Seis puntas de aguja, orientadas radialmente, rozaban el borde del disco a intervalos iguales. Cuando se alimentaba a la máquina, utilizando una fuente de 8000 a 13.000 voltios, se medían velocidades de rotación de hasta 12.000 revoluciones por minuto.

Yo he construido un motor de efecto corona con tubo de plexiglás de 5 centímetros de diámetro y 4 centímetros de longitud. Como electrodos usé cuchillas de afeitar de un solo filo sostenidas por un material rígido. El interior del tubo se forró con papel de aluminio, estratagema ideada en el laboratorio de Jefimenko para aumentar el gradiente de potencial en las proximidades de los electrodos y aumentar así la cantidad de carga que puede depositarse sobre la superficie del cilindro. Recubrí todas las superficies de las cuchillas de afeitar, a excepción de los filos, y todos los hilos de interconexión con "barniz anticorona", un líquido de aspecto parecido al cemento que se seca para formar una sustancia dieléctrica que reduce la pérdida de energía producida por las descargas de corona en aquellas partes del circuito no empleadas directamente en la producción de potencia.

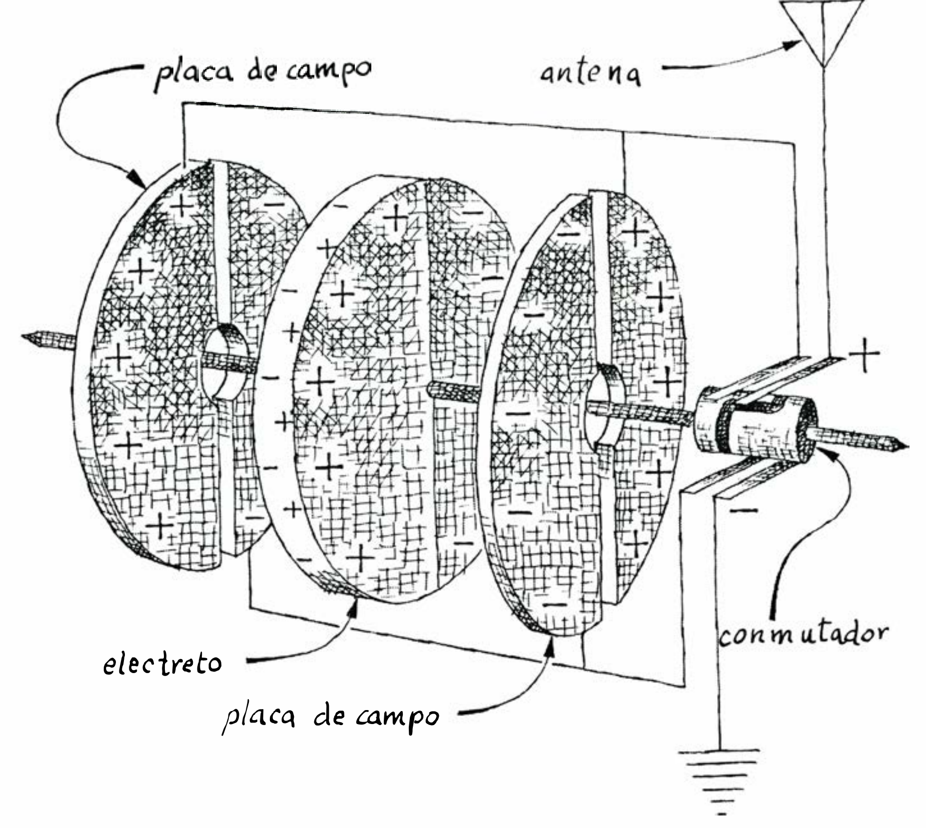
El eje central, que sostiene al cilindro sobre pivotes, se cortó de una aguja de acero para tejer. Los extremos del eje se afilaron y se pulieron hasta convertirlos en puntas de 30 grados. Para formar las puntas, fijé el eje en la mordaza de un taladro eléctrico manual, apliqué al metal una muela lubricada con aceite y pulí los pivotes resultantes contra una muela de madera recubierta de trípoli (sílice pulverulenta).

Los cojinetes que soportan los pivotes se obtuvieron del mecanismo de escape de un reloj despertador desechado. Un par de tornillos de ajuste, dentados, podrían reemplazar a los cojinetes del reloj. El bastidor soporte se fabricó de Lucita (plástico cuyo componente principal es el metilmecrilato polimerizado) de 0,63 centímetros de espesor. El motor puede hacerse de arranque automático y unidireccional inclinando las cuchillas. Quienes construyan la máquina pueden descubrir, como yo lo hice, que la parte más difícil del proyecto, equilibrar el rotor, viene después del montaje. El rotor debe equilibrarse estática y dinámicamente.

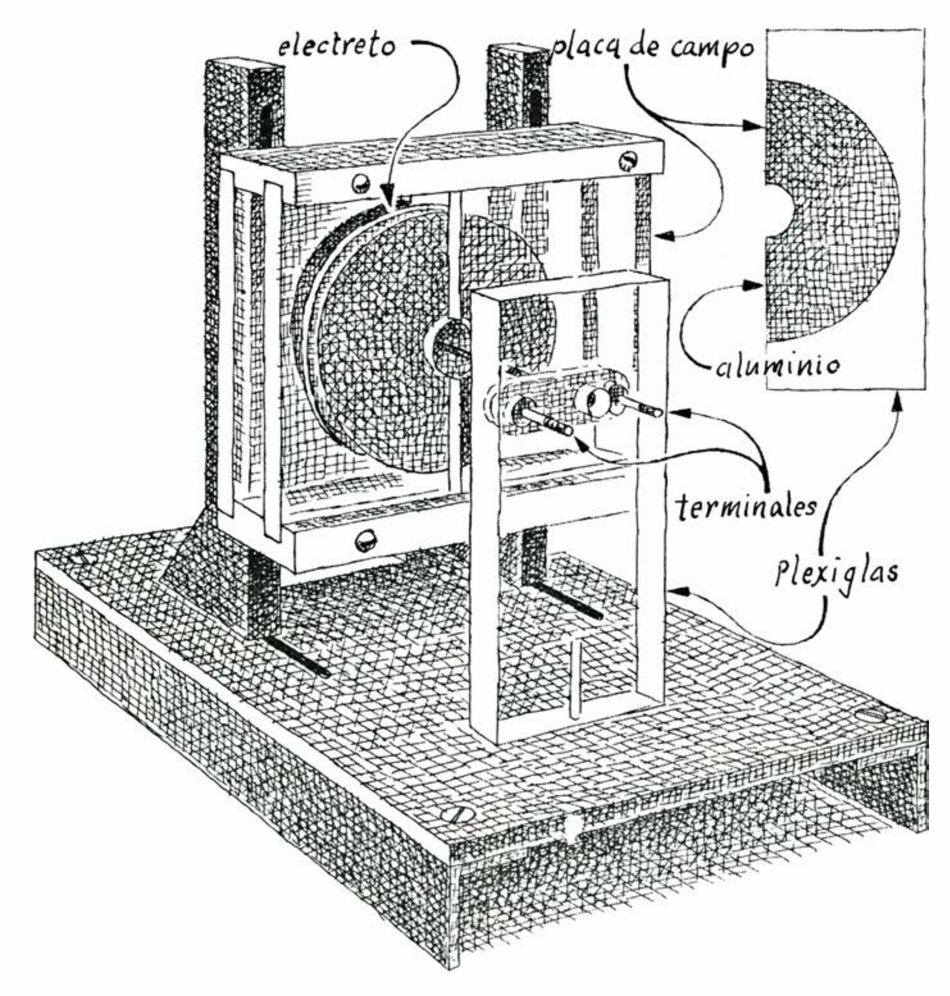
El equilibrado estático se consiguió, experimentalmente, añadiendo trozos pequeños de cinta adhesiva a la superficie interna de la lámina de aluminio que recubre el cilindro, hasta que el rotor permaneció sin moverse en cualquier posición en la que se le colocaba a mano. Cuando el rotor estuvo equilibrado se aplicó potencia; el motor adquirió rápidamente velocidad, pero con sacudidas violentas. Yo había corregido el desequilibrio causado por un exceso de pegamento en un extremo del rotor añadiendo un contrapeso en el lado opuesto del otro extremo del cilindro. Las fuerzas centrífugas en los extremos quedaron desfasadas en 180 grados, constituyendo así un par.

El equilibrio dinámico, que se consigue en gran medida mediante aproximaciones sucesivas, ocupa casi tanto tiempo como el resto de la construcción. Para comprobar el equilibrio dinámico, suspéndase el motor libremente con una cuerda, hágase girar a baja velocidad y júzguese por las oscilaciones dónde debe añadirse un contrapeso. La cinta adhesiva es un material de contrapeso adecuado ya que puede colocarse y desplazarse con facilidad.

Hice el motor tan ligero y libre de rozamientos como fue posible con el fin de



Circuito de motor de electretos de efecto de ranura



Motor de electretos de efecto ranura de Jefimenko

hacerlo funcionar con energía procedente del campo de la tierra. La energía se obtenía del campo mediante una antena de 8 metros de alambre trenzado, calibre núm. 28, aislado con plástico. En la clase de alambre empleado normalmente para interconectar los componentes electrónicos y puede adquirirse en establecimientos de artículos para radio.

La parte superior del hilo se conectó a un oropel metálico de 6 metros de longitud, del tipo de los que se emplean para decorar los árboles de Navidad. El oropel funciona como si fuese un conjunto de muchas puntas de aguja. Unas tiras cortadas de persianas metálicas para ventanas funcionarían sin duda igualmente bien.

El extremo superior del oropel se mantuvo en alto mediante un conjunto de tres globos meteorológicos, de 0,9 metros de diámetro cada uno, y rellenos de helio. El peso en kilogramos que puede levantar un globo de forma esférica, lleno de helio, es, aproximadamente, igual a cuatro veces el cubo de su radio expresado en metros. Para mi satisfacción, el motor comenzó a andar lentamente cuando el oropel alcanzó una altura de alrededor de 30 metros. A los 90 metros el rotor giraba a una velocidad entre 500 y 700 revoluciones por minuto.

Llegados a este punto, hay que hacer una advertencia. Aunque una antena vertical de 90 metros puede manejarse sin peligro con buen tiempo, puede adquirir una carga mortal durante las tormentas. Franklin tuvo una suerte increíble al sobrevivir después de su famoso experimento de la cometa. Un investigador europeo que trató de repetir las observaciones de Franklin fue muerto por un rayo. La antena de hilo de 90 metros puede adquirir carga suficiente para dar a una persona una descarga importante, incluso durante el buen tiempo. Siempre debe ponerse a tierra el extremo inferior del hilo cuando no esté alimentándose ninguna carga, tal como el motor.

Para hacer funcionar el motor, conéctese la antena a un conjunto de electrodos y póngase a tierra el otro. No conecte la antena a un objeto aislado de tamaño considerable, tal como un automóvil. Puede acumularse una carga peligrosa. No eleve nunca el globo sobre una ciudad o en cualquier otro lugar en donde la antena pueda entrar en contacto con un tendido eléctrico de alta tensión. No lo haga volar nunca debajo de las nubes, ni lo deje flotando sin prestarle atención.

En el laboratorio de Jefimenko se han construido diversos motores de efecto

corona. Este investigador ha llegado a la conclusión de que sus características pueden mejorarse ampliamente dando una forma adecuada a los electrodos en los que se produce el efecto corona. La superficie de trabajo de los rotores ha de fabricarse de un plástico más bien delgado, tal como el plexiglás o el mylar. Además como he indicado, la superficie interior del cilindro debe recubrirse con una hoja conductora para mejorar el efecto corona. Un cilindro eficiente puede conseguirse, sin grandes gastos, cortándolo de tuberías de plástico. Los rotores de efecto corona pueden fabricarse también en forma de disco.

Uno de los modelos consiste en una serie de discos montados sobre un eje común. Electrodos de doble filo colocados radialmente entre discos adyacentes funcionan de manera muy similar a los peines de Poggendorff. Este diseño no necesita de láminas que forren el cilindro interior o exteriormente ya que existe un gradiente de potencial entre electrodos situados a lados opuestos de los discos. Incluso es posible construir un motor de efecto corona lineal, diseño que sirve para conseguir un movimiento de translación. Para ello, se coloca una banda de plástico entre conjuntos de electrodos de borde afilado, inclinados para iniciar el movimiento en la dirección deseada.

Jefimenko prevé la posibilidad de una aplicación al menos limitada de las máquinas movidas por efecto corona, a pesar del problema de manejar potenciales del orden del millón de voltios sin materiales aislantes eficaces. En *The Physics Teacher* (marzo de 1971), él y David K. Walker escribían: "Estos motores pueden ser muy útiles para ser alimentados directamente por líneas de transmisión de corriente continua de alta tensión, como, por ejemplo, el enlace Pacífico Noroeste-Pacífico Suroeste, de 8 kV, que se está construyendo entre la cuenca del río Columbia y California. Se puede concebir el que tales motores pudiesen sustituir a las complejas instalaciones que ahora se necesitan para convertir corriente continua de alta tensión en corriente alterna de baja tensión. Todo lo que se requeriría, si se empleasen motores de efecto corona, sería accionar generadores locales de corriente alterna de baja tensión mediante motores de efecto corona alimentados directamente desde la línea de corriente continua de alta tensión."

Como señala Jefimenko, un factor que limita el empleo de los motores de efecto corona es que requieren un potencial mínimo de 2000 voltios. Esta limitación la elude un nuevo motor electrostático inventado en 1961 por un físico ruso, A. N. Gubkin. El motor está basado en un electreto fabricado en 1922 por Mototaro Eguchi, profesor de Física de la Escuela Naval Superior de Tokio.

Un electreto es una lámina o plancha de material dieléctrico ceroso que, por estar polarizado, es soporte de un campo eléctrico, más o menos como un imán permanente es soporte de un campo magnético. Una fórmula para fabricar un buen electreto es 45 por ciento de cera de carnauba, 45 por ciento de resina blanca transparente y 10 por ciento de cera blanca de abejas. Puede experimentarse con diversas ceras y resinas.

Los ingredientes se funden y se dejan enfriar, hasta solidificarse, en un campo eléctrico de corriente continua de varios miles de voltios. La polarización de la cera permanece y, por lo tanto, el campo eléctrico creado por ella, aun cuando la fuente externa de potencial haya desaparecido. (En la sección *The Amateur Scientist* del número de julio de 1968 de SCIENTIFIC AMERICAN se explica detalladamente la forma de construir electretos.) Los electretos reaccionan ante las cargas vecinas exactamente como si fueran un electrodo cargado, esto es, son atraídos o repelidos físicamente según la polaridad del electrodo vecino.

Gubkin controló este efecto para fabricar un motor. El rotor consistía en un par de electretos, en forma de sectores sostenidos en los extremos opuestos de un eje. El centro del eje estaba sostenido transversalmente por otro eje. Cuando el rotor giraba, los electretos barrían el campo existente entre pares adyacentes de placas metálicas cargadas, que tenían también forma de sectores.

Las placas se electrificaban mediante una fuente de potencia externa por medio de un interruptor inversor de polaridad, conocido como conmutador. El conmutador aplicaba a los electrodos una carga de polaridad opuesta a la carga del electreto atraído. A medida que el electreto se movía entre las placas, el conmutador conmutaba las placas a fin de hacer coincidir su polaridad con la del electreto. Los impulsos alternativos comunicaban al rotor un momento, exactamente como ocurría en el motor de Franklin.

El motor de Gubkin era deficiente en dos aspectos importantes. Las distancias entre los electrodos y los electretos eran grandes sin necesidad, de tal forma que las fuerzas de atracción y repulsión eran injustificadamente débiles. Además, durante el paso del electreto entre los electrodos sus superficies no estaban

apantalladas. Los electretos sin apantallamiento atraen del aire iones que los neutralizan, perdiendo así su carga al cabo de horas o de días.

Ambas deficiencias inherentes al motor de Gubkin han sido corregidas en el laboratorio de Jefimenko utilizando las ventajas de lo que se denomina efecto de ranura. En lugar de colocar el electreto alternativamente entre pares de placas metálicas, Jefimenko utiliza pares opuestos de placas adyacentes. Las placas adyacentes están separadas por una ranura estrecha. Cuando las placas adyacentes tienen cargas de polaridad opuesta, el electreto se ve sometido a una fuerza dispuesta en su propio plano y perpendicular a la ranura. La intensidad de esta fuerza es máxima ya que el electreto está próximo a los electrodos. Al mismo tiempo, los electrodos funcionan como pantallas e impiden la neutralización del electreto ocasionada por iones libres.

Los motores basados en el efecto de ranura pueden diseñarse de varias formas. Uno de ellos consiste en un electreto en forma de lámina fina de mylar sostenida por un disco plano de madera de balsa de 100 milímetros de diámetro y tres milímetros de espesor. (A la lámina de mylar se le imparte una carga de larga duración introduciéndola en un campo de unos cuantos miles de voltios producido por un generador electrostático, una vez que el motor ha sido montado.) Este rotor se empareda entre cuatro sectores semicirculares conectadas en cruz (*véase la ilustración superior de la página 112*).

El electreto se monta en un eje de plástico de cuatro milimetros de diámetro que gira sobre cojinetes de rubí. Las superficies conductoras del conmutador están formadas por tinta china seca. Las escobillas son cintas de hoja de aluminio para envolver alimentos de un milímetro de espesor. El motor funciona con una potencia de unos cuantos microvatios.

Jefimenko ha hecho demostraciones con un motor parecido que estaba proyectado para girar a una velocidad de unas 60 revoluciones por minuto y desarrollaba una millonésima de caballo, mediante una antena de 7 metros de longitud que llevaba en su extremo superior una pequeña sonda de polonio. (Al emitir cargas positivas, las sondas de este tipo aprovechan el campo terrestre de forma algo más eficiente que las puntas de aguja.) El funcionamiento del motor alcanza fácilmente las especificaciones de proyecto. El atractivo de estos motores reside en el hecho de que, aunque no pueden ejecutar grandes cosas, pueden funcionar eternamente.

Libros

El irresistible avance de los virus lentos y las modificaciones estructurales de la sociedad

Philip Morrison y Luis Vila López

SLOW VIRUSES, por David H. Adams y Thomas M. Bell. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (7,50 dólares). Slow Virus diseases of animals and Man, dirigido por R. H. Kimberlin. American Elsevier Publising Company, Inc. (45,95 dólares). Inyéctese a una rata una dosis de virus de Riley, un agente extractado de tumores; después de un período de seis horas en estado latente, la concentración de virus se duplicará cada hora durante medio día. Inyéctesele en cambio una cantidad del agente de la enfermedad ovina llamada prúrigo lumbar (scrapie) y vigílese la concentración, que sólo puede medirse mediante dilución e inyección en otras ratas; no se observará nada durante tres o cuatro meses, y luego, de pronto, se verá un aumento por un factor de diez en apenas un par de semanas. Prúrigo es el prototipo de las enfermedades víricas léntas: lentas en aparecer, lentas en desarrollarse y lentas en exhibir sus efectos específicos, que generalmente son fatales.

Estos dos libros –uno de ellos una reseña personal y osadamente generalizadora de dos virólogos ingleses, cuyo interés principal es la enfermedad humana, y el otro una colección de detalladas reseñas publicadas por 20 científicos internacionales, la mayoría de los cuales trabajan en laboratorios de patología animal– son distintos, aunque complementarios. No concuerdan ni en las definiciones ni en su alcance, representan una panorámica general el uno, y un estudio en profundidad el otro, pero en conjunto acercan al lector a este mundo patológico intrigante, en donde en la frontera de nuestros conocimientos se unen la virología, la inmunología y la patología. Adams y Bell ofrecen una lectura fácil, pero el relato alusivo y experto se hace más concreto, a partir del jugoso detalle del otro libro, más voluminoso, si bien éste a su vez entra en detalles que el lector común no puede seguir.

Los temas principales son enfermedades de la rata, el visón y el hombre. Respecto de una docena de enfermedades fatales del sistema nervioso central humano se sospecha que proceden de virus lentos, y quizá sobre unas cuatro hay certeza en este respecto. Adams y Bell rechazan de hecho el estado mejor comprendido de todos los descritos, estimando que no entra en la clasificación. Se trata de la enfermedad aleutiana del visón, llamada así porque con el tiempo llega a ser invariablemente fatal para una cepa mutante de visón cuyo pelaje de color claro, muy de moda, se parece al del zorro azul de las islas Aleutianas. En un comienzo, la enfermedad parecía hereditaria y ligada a la mutación, pero llegó a saberse que el visón normal también se contagia, si bien con menor mortalidad. El virus se desarrolla con bastante rapidez, pero el animal muere sólo después de un dilatado esfuerzo renal, a consecuencia de la producción descontrolada de un anticuerpo que es inútil para combatir al virus. En sentido estricto, únicamente las células del sistema nervioso central de los mamíferos, células no regenerativas y de lento desarrollo, son huéspedes apropiados de un virus lento.

Los problemas más misteriosos y los estudios más incisivos se centran hoy en día en la enfermedad ovina (ovejas y cabras) llamada prúrigo lumbar, conocida hace largo tiempo. Ya en la época de Jorge III (hacia 1800), el prúrigo lumbar era la enfermedad "más calamitosa" para el ovejero inglés. Es una infección fatal del sistema nervioso central que ataca a su víctima a los tres o cuatro años de edad, habiendo entrado en ella, invisible, al nacer o casi al nacer. (La ganadería ovina limita el promedio de vida del animal a unos cinco años.) El nombre proviene del hábito del animal enfermo de frotarse incesantemente contra cercos o postes hasta que se le crean grandes heridas ("to scrap" significa rascarse). Los animales mueren al cabo de semanas o meses después de aparecer los primeros síntomas; no es insólito que perezca un 10 por ciento de los animales adultos en una epidemia. En 1939, el prúrigo atacó unas ovejas que habían sido vacunadas, un par de años antes, con cerebro de oveja inactivado con formaldehído, contra la enfermedad denominada "louping ill" (una especie de encefalitis). Se demostró que el prúrigo era una enfermedad infecciosa y se comprobó por primera vez la notable resistencia del agente al ataque químico, como también lo es a la radiación e incluso al calor.

En 1961 se traspasó por primera vez el prúrigo lumbar a ratas, que mueren invariablemente de lesiones del sistema nervioso central. La enfermedad es también lenta en estos animales: lleva unos 8 meses el diagnosticar scrapie en la rata para así completar el análisis. Un trabajo tan paciente ha tenido notables recompensas; los resultados plantean incluso la posibilidad de que "el dogma central" de la biología molecular pueda zozobrar ante el agente desconocido de esta desagradable enfermedad ovina. No se halló ácido nucleico ninguno en ese agente. Con el microscopio electrónico no han podido verse poliedros víricos. Filtros de un tamaño de poro bastante grande eliminan el agente infeccioso, y, sin embargo, la gran dosis de radiación necesaria para inactivarlo hace pensar que el tamaño de la molécula causante de la infección se acerca al límite inferior de tamaño de los virus. La inactivación mediante luz ultravioleta mostró una dependencia de la longitud de onda muy distinta del espectro de absorción del ADN. Tal vez, dijo una vez Adams, sea un "virus revestido de azúcar": una cinta de ADN con una cápsula de polisacáridos (en vez de la conocida cápsula proteica) que puede anudar más apretadamente y proteger mejor la información. Actualmente, se cree que tal vez las estructuras de la membrana de la célula huésped

sean las que desempeñan el papel protector. Al eliminar todos los componentes de las células cerebrales excepto la membrana (y, más recientemente, se ha intentado eliminar también los componentes de la membrana por procedimientos químicos) la concentración del agente del scrapie se centuplica. Queda mucho por recorrer hasta revelar un pequeño paquete de ADN, pero parece que hay posibilidades de que sobreviva el dogma antedicho. En los dos últimos años se ha encontrado virus vegetales pequeños y resistentes a la radiación ultravioleta; después de todo, puede que la controversia "haya sido un puro artefacto... la incapacidad de reconocer la medida en que el ácido nucleico puede ser desensibilizado" por moléculas íntimamente relacionadas con él.

El agente del prúrigo, al ser introducido en el visón, produce una enfermedad indistinguible de una epizootia que se observó por primera vez en un criadero en 1947. Esta "encefalopatía transmisible del visón" no se propaga por contacto, y no pasa de la madre a los cachorros. Es muy presumible que entre con el alimento: a los visones se les da carne de cordero. Los seres humanos también sufren una enfermedad semejante al prúrigo, rara y de lenta aparición, que se encuentra en pacientes con una predisposición heredada y que es siempre fatal por un deterioro mental progresivo. Se ha encontrado que unos libios que han inmigrado a Israel sufren la enfermedad de Creutzfeldt-Jakos, con una tasa 30 veces superior a la normal. Estas personas comen sesos de oveja. Entre los miembros del pueblo Fore de Nueva Guinea, las mujeres y los niños de ciertos grupos sufren de "Kuru", enfermedad parecida, que va asociada con el rito extraordinario y recientemente adoptado de frotar con los sesos de un hombre que ha muerto a los parientes en duelo de la rama femenina de la familia. Se ha demostrado que el "Kuru", enfermedad que antes se creía genética por estar ligada al sexo, es también infecciosa: puede ser transmitida a muchos primates de laboratorio.

Tras estos relatos de tragedia y misterio se esconde un reto. Hay desórdenes fatales mucho más corrientes, la esclerosis múltiple por ejemplo, que podrían pertenecer a la clase compleja y sutil de los virus lentos. Si se suma el total de ellos, quizá una persona de cada 100 muera actualmente de ese ataque furtivo, apenas reconocido pero penosísimo para el paciente y para la sociedad, durante años de gradual deterioro e incapacidad. Hay señales enigmáticas de una conexión entre un virus ARN, como el organismo de la rubéola, y ciertos virus ADN lentos, como si esa transcripción fuese de importante efecto clínico. En efecto, el mismo virus lento ocasiona dos difundidas enfermedades ovinas observadas por vez primera en Islandia, una, la enfermedad destructora del sistema nervioso central llamada visna y, la otra, una pulmonía crónica muy retardada.

He aquí un reto para la biología molecular en su propio terreno, importante y atormentador, pero mucho más sencillo que los aspectos del desarrollo subyacentes en las enfermedades malignas. (P. M.)

LA SOCIOLOGIA INDUSTRIAL Y DE LA EMPRESA por Rafael López Pintor Barcelona, editorial Vicens-Vives, 1976. El ámbito de temas y cuestiones, referidos al mundo de la industria y de la empresa, en el que se puede hablar de un "enfoque sociológico", ha sido objeto de denominaciones diversas, más o menos comprensivas. El libro de López Pintor viene a sumarse al elenco de obras que bajo títulos tales como "Sociología de la industria", "Sociología de la empresa", "Sociología económica", "Sociología del trabajo", etc., presentan esta problemática. Las evoluciones del contenido de las mismas van acotando esta subdisciplina sociológica, cuya institucionalización universitaria entre nosotros puede ser un factor más de interés para su mayor sistematización.

Las circunstancias personales y de oportunidad que parecen desprenderse de la lectura y composición del libro, orientan la valoración del mismo. Pero es importante destacar antes la arquitectura interna de la obra, dividida en cuatro capítulos, correspondientes respectivamente a "concepto y método" y a las tres grandes áreas de problemas que, a juicio del autor, definirán esta rama de la sociología: Industrialización y cambio social, Teoría de las organizaciones complejas y Teoría del trabajo.

Ya en la "Introducción" expone el autor su pretensión de diferenciarse de los manuales, traducidos, que abordan la problemática sociológica de la industria y de la empresa, en favor de una "visión actualizada y en términos muy amplios de las fronteras de la sociología industrial" (pág. XV). Dicha actualización se refleja al considerarla como "un producto decantado a lo largo del siglo, en parte como una prolongación o persistencia de los planteamientos de los sociólogos del siglo XIX sobre la problemática de la industrialización, pero sobre todo como una derivación del empirismo de principios del siglo aplicado con las aportaciones de la sociología de las organizaciones, sobre todo a partir de la segunda guerra mundial. Por supuesto, detrás de este movimiento está la demanda de investigación por parte de la industria, a medida que avanza el proceso de desarrollo industrial" (XVI).

El capítulo I expone el concepto y método de la sociología industrial. Históricamente, son los nuevos fenómenos que aparecen con la Revolución industrial los que ocupan la atención de los clásicos. La revisión que hace López Pintor (a través de citas indirectas: Coser, Bell, Aron) de Saint-Simon, Durkheim, Max Weber, Marx, Simmel, Sombart, Pareto, Manheim, Veblen, etc., sugiere los problemas que van a definir posteriormente, a partir del siglo XX en sus primeras décadas, a la sociología industrial como una sociología especial. A estas cuestiones de los clásicos se añaden ahora los nuevo fenómenos: fin del colonialismo, extensión del socialismo, transformaciones en la estructura social de las sociedades industriales, actitudes ante el trabajo, etc.

Más pragmáticamente, otra vía de definición sería atender a lo que los llamados sociólogos industriales hacen, que está "más allá de una sociología estrictamente limitada al análisis de la organización empresarial y no llega a ser plenamente una sociología de la sociedad industrial" (14). Los terrenos más cultivados se encuadran, por una parte, dentro de la tradición empirista, con las encuestas y experimentos que han destacado la importancia de los grupos informales. Dentro de éstos y debido a las implicaciones de la tecnología, el interés se desplaza desde las relaciones hombre-hombre, hacia el problema de las relaciones hombre-máquina, con las novedades de "trabajo y ocio", "significados de trabajo" y "aparición de nuevas clases" en relación con las actitudes ante el trabajo.

La sociología de las organizaciones también recoge la aparición de nuevas clases en la sociedad industrial, con especial énfasis en la burocratización de la empresa y la sociedad.

La pervivencia de los temas de los clásicos aparece bajo la denominación de "cambio social e industrialización", relacionada esta última con las etapas de desarrollo en que se encuentra el país.

Del anterior elenco de cuestiones se desprende el carácter disperso del desarrollo de la disciplina. Esta heterogeneidad exige su reducción a esquemas comprensivos.

En cuanto al método característico de la sociología industrial, el autor hace suya la afirmación de Dahrendorf, para quien no aparece distinción (?), en el planteamiento metódico y en las técnicas de investigación, respecto a la sociología general. Los métodos dependerán del tipo de problemas a investigar y de los recursos con que se cuenta.

Como colofón de este capítulo se indican las principales aportaciones de los sociólogos españoles, así como una panorámica de la sociología industrial en los países del Este.

Al concluir este capítulo sobre el ámbito de la sociología industrial ya se advierte cómo la ambiciosa pretensión de López Pintor, que va a desarrollar a lo largo de centenar y medio de páginas, va a quedar en un catálogo de fichas comentadas, como es propio de las memorias de cátedras. Lo cual no es restarle valor y utilidad a la obra, pero sí reducirla a sus justos alcances. Como catálogo de fichas, es fácil no ser exhaustivo: un índice de autores facilitaría la tarea de completarla.

La naturaleza de la Revolución industrial y el tipo de sociedad a que ha dado lugar, así como las interpretaciones de la primera en las obras de Marx y Weber, abren este capítulo. Si ya los grandes temas del industrialismo, en los autores clásicos, fueron sugeridos en el capítulo primero, el autor destaca ahora el grave y actual problema de la industrialización en las sociedades dependientes. Es éste un capítulo temático donde abundan la producción escrita de políticos, sociólogos y economistas, y de ahí la urgencia de una clasificación de las teorías.

López Pintor las agrupa en cuatro bloques. Los dos primeros, de marcado carácter, incluyen las teorías económicas del desarrollo (Rostow, Harrod-Doman, Hicks) y las teorías del "factor humano", con especial hincapié en el tipo de personalidad propulsor del desarrollo (Harbinton, Myers, Kerr, Dunlop, Hagen, McClelland). Teorías más integradoras resultan las aportaciones de Myrdal (causación circular), Florence y algunos latinoamericanos que intentan una integración de las distintas dimensiones de la realidad social. El entronque con la tradición marxista aparece en las teorías de la dependencia estructural, representada en la obra de Celso Furtado (dualismo estructural).

En la línea de una cierta "futurología social", la revisión de las obras de Bell, Richta y Touraine, acerca de la sociedad post-industrial, aparecen como puntos de partida para desarrollar modelos concretos de análisis sobre el tipo de sociedad que puede avecinarse. El análisis de la política en la sociedad post-industrial resulta ejemplificador, a partir del caso norteamericano, para descubrir las nuevas formas de participación, de poder y de conflicto, que manifiestan la importancia que el conocimiento (ciencia y técnica) tiene en la transformación y gobierno de la sociedad. Llegado el momento de tomar postura ante estas proyecciones de futuro que asoman ya en algunas sociedades avanzadas, López Pintor aborda su crítica personal después de realizar la crítica interna de los autores que glosa. Esta crítica interna se sustenta en los diferentes puntos de partida, referentes empíricos y supuestos ideológicos (modelo de sociedad deseada) de los autores. En el fondo se trata de concebir la sociedad como un todo en el que las partes, ni siquiera a efectos de análisis, pueden ser separadas; o también partir de que la sociedad sea la suma de unos sectores (política, economía, cultura) cada vez más independientes y donde caben conflictos "sectoriales" que no comprometen la sociedad global.

Para López Pintor el concepto de sociedad "post-industrial" es un concepto poco oportuno y que puede hacer más difícil la comprensión de la realidad actual. La detención del proceso acumulativo post-industrial, mientras emergen nuevos países industrializados, es una posibilidad igual que su contraria: el mantenimiento del proceso de acumulación con crecimiento de las sociedades post-industriales (reducidas a bloques hegemónicos internacionalmente). Una tercera posibilidad no puede descartarse: la de un retroceso debido a cualquier conflicto generalizado. Lo que en estas hipótesis subyace es el mantenimiento de la dependencia del Tercer Mundo, sin la cual la brecha entre las sociedades post-industriales y el resto no es pensable.

Concluye el autor: "Mi crítica no es tanto a una inadecuación sociológica de raíz en el concepto de sociedad post-industrial, tomado en su más amplia acepción, sino a su inoportunidad científica" (84). Esta falta de oportunidad se debe a que los conceptos pueden ser a veces cortinas de humo que impiden ver la realidad, en la medida que siempre incluyen valores.

La aspiración a una sociedad más igualitaria puede quedar enmascarada bajo el uso de la terminología "post-industrial". Ciertamente se pierden de vista los contornos más sórdidos sobre los que destaca el fenómeno industrial que veremos visualizar. Pero, a mi entender, esta crítica no resulta excesivamente científica, aún con plena conciencia de toda la problemática sobre "lo científico y lo axiológico". Unicamente cabría seguir utilizando el concepto, siempre con las matizaciones necesarias, para que al enfocar el problema de determinado tipo de sociedad no se dejen en olvido ni el "humus" específico del científico social ni el entorno de los destinatarios de su obra.

Al adentrarse en el tema de las organizaciones complejas, el autor introduce un vasto y elaborado campo de la sociología, en el ámbito de su sociología industrial. Se asume de este modo una teoría que recoge conocimientos generados desde disciplinas bien diversas. Así, la primera semejanza aparece al comparar la formulación de problemas en la teoría de la organización y en la teoría política; existen unos problemas comunes como son la naturaleza de la base normativa de toda organización, la explicación de la obediencia y la docilidad, la conciliación de los intereses individuales y los colectivos, etc.

Dejando de lado estos paralelismos, la teoría agrupa los problemas internos de la misma en cuatro bloques. El primero, sobre estructura de las propias organizaciones, es la preocupación fundamental de Taylor y su escuela (estructura de la autoridad, división del trabajo, comunicación y toma de decisiones). Las limitaciones que se manifiestan en la pretensión de racionalidad de las organizaciones constituyen el segundo bloque: ahí se nos habla de la crítica neoestructuralista a los principios de la organización científica del trabajo; realzando la importancia de la organización informal en los grupos de trabajo; igualmente, los "desplazamientos de metas" ponen en entredicho la racionalidad. La posibilidad de conflicto de racionalidades es una manifestación del conflicto de intereses, dado que cabe distinguir aquella racionalidad centrada fundamentalmente en la producción de la que busca primordialmente la autorrealización de sus componentes: es el tercer bloque. Por último, la atención al entorno de la organización, sean la clientela, los competidores, la incertidumbre tecnológica o los antecedentes sociales y culturales de los individuos que se incorporan a la organización.

Ante esta variedad temática, con tal diversidad de enfoques e intereses, cabe preguntarse si es posible una teoría general aplicable a todos los tipos de organizaciones. En cierto sentido, si agru-

pamos las teorías conforme siguen los modelos de conflicto o de integración encontramos el modelo natural o abierto y el modelo racional, cerrado. En este sentido simplificador, se identifican los supuestos básicos de las teorías que versan sobre el ser humano (su interpretación) y las estructuras formales de toda organización, como son la autoridad y la comunicación organizacional.

En el estadio presente de la teoría, los indicadores críticos de la misma son la clasificación de las organizaciones y el análisis de sus metas. La tarea taxonómica, que no ha agotado todas sus posibilidades, se ha llevado a cabo con diferentes criterios: la función, el beneficiario principal de la actividad de la organización, el tipo de control existente, etc. Otra forma seguida para derivar una tipología de las organizaciones ha sido el análisis de la masa de información empírica sobre las mismas, previamente ordenada.

El otro indicador –análisis de las metas– es más problemático, ya que no existe unanimidad acerca de la unidad o pluralidad de metas, aparte de la supervivencia de las organizaciones. Un fenómeno al que en este tema se le dedica especial atención es el del "desplazamiento de metas", cuando los medios, en una organización, llegan a convertirse en sus fines.

El último capítulo de la obra de López Pintor aborda un tema fundamentalmente teórico, aunque sin olvidar la síntesis de las investigaciones empíricas más destacadas, tanto acerca de la vivencia que el hombre tiene de su trabajo, como sobre las actitudes que éste genera en aquél. Es éste un campo en que se ha manifestado un destacado incremento en las técnicas de medición y análisis y sobre el que se ha volcado la mayor parte de la investigación sociológico-industrial de los últimos cincuenta años.

Acerca del trabajo industrial, la teoría y la investigación empírica se sitúan en tres áreas: la consideración del trabajo industrial como una forma más de desarraigo de la vida tradicional puesta en crisis por la Revolución industrial, el trabajo como una actividad que desgaja la unidad de la vida personal y social del hombre, y las dimensiones objetivas y subjetivas de la alienación en el trabajo. El primer tema se corresponde con el análisis de la anomía, que pone en cuestión el concepto mismo de civilización industrial.

Las transformaciones estructurales y culturales que ésta supone, conducen al estudio de la alienación, ya total del hombre o bien limitada al ámbito del trabajo, tanto por sus bases objetivas como atendiendo a la percepción que el individuo posee. La posibilidad de liberación humana induce a la búsqueda de los factores determinantes de la satisfacción en el trabajo. Entre estos factores se ha considerado la motivación económica, la motivación social, la tecnología, la automación y especialmente la relación entre trabajo y ocio. El sesgo ideológico de los autores se descubre en la medida en que, al tratar de la autorrealización en el trabajo, ponen o no en cuestión la estructura de la sociedad industrial capitalista: aceptándola, se da pie a la crítica más radical a la Neoescuela de las Relaciones Humanas (McGregor, Argyris, Herzberg) como un movimiento psicologista que busca el ajuste de los individuos a una situación. Todos estos son los temas y problemas e hipótesis que han marcado el desarrollo teórico en esta área de la sociología industrial.

Las actitudes ante el trabajo han sido objeto de investigaciones sobre las que más se ha desarrollado el tema. No ha sido un campo del que ha estado ajena la tradición europea. Todo este conjunto de investigaciones empíricas y pragmáticas nos ha dejado un cuerpo conceptual que es la teoría de actitudes. En la medición de éstas no debe olvidarse que la autoexpresión de satisfacción no es medida fiel de la integración con el trabajo ni indicador de la bondad objetiva del sistema económico en que tiene lugar. Las posturas ideológicas del sociólogo vuelven aquí a manifestarse, como tantas veces, arropadas bajo sus tecnicismos y sus cuantificaciones.

Ante una obra fundamentalmente expositiva, cabe echar en falta determinadas ausencias, de las que siempre es posible excusarse cuando no se ha pretendido una revisión bibliográfica exhaustiva.

Escasamente crítica y original, es válida como una introducción a un área de conocimientos que, por otra parte, no queda suficientemente deslindada. Los criterios taxonómicos en las ciencias sociales deben quedar lo suficientemente explicitados para evitar repeticiones respecto a otras especialidades y para justificar las inclusiones en un programa coherente. Creo que la pretensión de "trazar en términos amplios las fronteras de la sociología industrial" deja al final la duda de si nos encontramos ante algo diferente de la sociología del trabajo, la sociología de las organizaciones y las otras divisiones temáticas que son posibles y tienen ya carta de naturaleza. (L. V. L.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA ELIMINACION DE LOS RESIDUOS RADIACTIVOS

ALTERNATIVES FOR MANAGING WASTES FROM REACTORS AND POST-FISSION OPERATIONS IN THE LWR FUEL CYCLE. Division of Nuclear Fuel Cycle and Production. Energy Research and Development Administration Report ERDA-76-43, 1976.

ENVIRONMENTAL SURVEY OF THE REPROCESSING AND WASTE MANAGEMENT PORTIONS OF THE LWR FUEL CYCLE. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG-0116, 1976.

HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE FROM LIGHT-WATER REACTORS. Bernard L. Cohen en *Reviews of Modern Physics*, vol. 49, n.º 1, págs. 1-20; enero, 1977.

EL ACEITE DE OLIVA

THE ROLE OF FATS IN HUMAN NUTRITION. A. J. Vergroesen, Academic Press, London, New York, 1975.

INVESTIGACIONES EN MARCHA EN EL INSTITUTO DE LA GRASA DE SEVILLA SOBRE LA QUIMICA DEL ACEITE DE OLIVA. J. M. Martinez Moreno, Actas del II Congreso Internacional sobre el Valor Biológico del Aceite de Oliva, Torremolinos, 1975. Publicadas por el Consejo Oleícola Internacional. Madrid, 1976.

LA UTILIDAD DE LA RADIACION DE SINCROTON

SYNCHROTRON RADIATION AS A LIGHT SOURCE. R. P. Godwin en *Springer Tracts in Modern Physics*, vol. 51, págs. 1-73; 1969.

RESEARCH APPLICATIONS OF SYNCHROTRON RADIATION. Brookhaven National Laboratory Report No. 50381, 1973.

AN ASSESSMENT OF THE NATIONAL NEED FOR FACILITIES DEDICATED TO THE PRODUCTION OF SYNCHROTRON RADIATION. The Panel to Assess the National Need for Facilities Dedicated to the Production of Synchrotron Radiation, Solid State Sciences Committee, National Research Council. National Academy of Sciences, 1976.

VIDA MICROBIANA EN LAS PROFUNDIDADES MARINAS

BAROBIOLOGY AND THE EXPERIMENTAL BIOLOGY OF THE DEEP SEA. Ralph W. Brauer. North Carolina Sea Grant Program, School of Public Health, University of North Carolina, 1972.

DEEP-SEA MICROORGANISMS: IN SITU RESPONSE TO NUTRIENT ENRICHMENT. Holger W. Jannasch y Carl O. Wirsen en *Science*, vol. 180, n.º 4086, págs. 641-643; mayo 11, 1973.

UNDECOMPRESSED MICROBIAL POPULATIONS FROM THE DEEP SEA. H. W. Jannasch, C. O. Wirsen y C. D. Taylor en *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 32, n.º 3, págs. 360-367; septiembre, 1976.

LOS GLOBULOS DE BOK

INTERSTELLAR MATTER en *Astronomy of the 20th Century*. Otto Struve y Velta Zebergs. The Macmillan Company, 1962.

DARK NEBULAE. B. T. Lynds en *Nebulae and Interstellar Matter*, dirigido por Barbara M. Middlehurst y Lawrence H. Aller. The University of Chicago Press. 1968.

RADIO RADIATION FROM INTERSTELLAR MOLECULES. B. Zuckerman y Patrick Palmer en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 12, págs. 279-313; 1974.

MEMORIA ESPACIAL

BEHAVIORAL CORRELATES AND FIRING REPERTOIRE OF NEURONS IN THE DORSAL HIPPOCAMPAL FORMATION AND SEPTUM OF UNRESTRAINED RATS. James B. Ranck, Jr., en *The Hippocampus*, dirigido por Robert L. Isaacson y Karl H. Pribram. Plenum Press, 1975.

HIPPOCAMPAL ELECTRICAL ACTIVITY AND BEHAVIOR. A. H. Black en *The Hippocampus; vol. II*, dirigido por Robert L. Isaacson y Karl H. Pribram. Plenum Press, 1975.

REMEMBRANCE OF PLACES PASSED: SPATIAL MEMORY IN RATS. David S. Olton y Robert J. Samuelson en *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, vol. 2, n.º 2, págs. 97-116; abril 1976.

ENSEÑANZAS DE LA FIBROPLASIA RETROLENTAL

RETROLENTAL FIBROPLASIA: COOPERATIVE STUDY OF RETROLENTAL FIBROPLASIA AND THE USE OF OXYGEN. V. Everett Kinsey en *Archives of Ophthalmology*, vol. 56, págs. 482-543; 1956.

COST OF PREVENTING RETROLENTAL FIBROPLASIA? K. W. Cross en *The Lancet*, vol. II for 1973, n.º 7835, págs., 954-956; sábado, octubre 27, 1973.

LECTINAS

THE INTERACTIONS OF LECTINS WITH ANIMAL CELL SURFACES. Garth L. Nicolson en *International Review of Cytology*, vol. 39, págs. 89-190 1974.

TUMOR CELL SURFACES: GENERAL ALTERATIONS DETECTED BY AGGLUTININS. Annette M. C. Rapin y Max M. Burger en *Advances in Cancer Research*, vol. 20, págs. 1-91; 1974.

USE OF LECTINS FOR THE STUDY OF MEMBRANES. Nathan Sharon y Halina Lis en *Methods in Membrane Biology: vol. III*, dirigido por Edward D. Korn. Plenum Press, 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

A BUDGET OF PARADOXES: SECOND EDITION. Augustus De Morgan, dirigido por David Eugene Smith. The Open Court Publishing Co., 1915.

A HISTORY OF MATHEMATICS. Carl B. Boyer. John Wiley & Sons. Inc., 1968.

TALLER Y LABORATORIO

ELECTROSTATIC MOTORS: THEIR HISTORY, TYPES AND PRINCIPLES OF OPERATION. Oleg D. Jefimenko. Electret Scientifc Company, 1973.

ELECTROSTATICS AND ITS APPLICATIONS. Dirigido por A. D. Moore. John Wiley & Sons, 1973.